

Joonas Sorri

Ratapäiväauton aerodynamiikan parantaminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

1.5.2018

Tekijä(t) Otsikko	Joonas Sorri Ratapäiväauton aerodynamiikan parantaminen
Sivumäärä Aika	58 sivua 24.5.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja(t)	Lehtori Pasi Oikarinen
<p>Tämän insinööriyön tavoite oli parantaa Mazda Miata -ratapäiväauton aerodynaamista suorituskkyä numeerisen virtausdynamiikan simuloinnin avulla. Lisäksi tarkoituksena oli tarkastella numeerisen virtausdynamiikkasimuloinnin käyttöä amatööritason kilpa-autoilussa.</p> <p>Työ toteutettiin luomalla 3D-malli tutkittavasta autosta Catia 3D -mallinnusohjelmistolla. Tätä mallia käyttämällä suoritettiin numeerisia virtausdynamiikan simulaatioita OpenFoam-simulaatio-ohjelmistolla. Simulaatioiden tuloksia käyttämällä suunniteltiin auton aerodynaamista suorituskkyä parantavia osia. Suunnittelun jälkeen osat hankittiin tai valmistettiin ja asennettiin autoon. Lopuksi Ahveniston moottoriradalla suoritettiin käytännön koe, jossa verrattiin paranneltua aerodynaamista kokonaisuutta autoon ennen muutoksia.</p> <p>Simulaatioiden tulosten mukaan auton aluksi tuottama 600 newtonin nostovoima saatiin muutettua 1300 newtonin negatiiviseksi nostovoimaksi. Tuloksista nähtiin myös, että auton tuottama ilmanvastus nopeudessa 160 km/h kasvoi 910 newtonista 1130 newtoniin. Käytännön kokeessa kierrosaika parani noin sekunnin uusien suunniteltujen osien asentamisen jälkeen, mutta muiden muuttujien takia aerodynaamisten muutosten vaikutusta kierrosaikaan ei voitu määrittää varmasti. Käytännön kokeessa saavutettiin kierrosaika 1:29.6. Numeeristen virtausdynamiikkasimulaatioiden käyttäminen katsottiin lopputuloksen kannalta hyödylliseksi.</p>	
Avainsanat	aerodynamiikka, numeerinen virtausdynamiikka, simulaatio, kilpa-autoilu, suunnittelu

Author(s) Title	Joonas Sorri Improving the Aerodynamics of a Trackday Car
Number of Pages Date	58 pages 24 May 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor(s)	Pasi Oikarinen, Lecturer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to improve the aerodynamic performance of a Mazda Miata trackday car by utilizing computational fluid dynamics simulations. Another objective was to examine the utilization of computational fluid dynamics in amateur racing.</p> <p>The thesis was carried out by creating a 3D-model of the examined car in Catia 3D-modeling software. This model was used to carry out computational fluid dynamics simulations in OpenFoam simulation software. The results of these simulations were used to design parts to improve the aerodynamic performance of the car. After all the parts were designed they were acquired or fabricated and installed to the car. Finally, a practical test was executed at Ahvenisto race track, in which the new improved aerodynamic setup was compared to the car before the changes.</p> <p>The results of the simulations showed that the car produced initially 600 Newtons of lift and after the changes 1300 Newtons of downforce. The results also showed that aerodynamic drag that the car must overcome at 160 kph increased from 910 Newtons to 1130 Newtons. In the practical test an improvement of about one second was seen between the initial setup and the new setup utilizing the newly designed parts. Because of other variables defining the certain effect to the lap times caused by the aerodynamic changes was not possible. A lap time of 1:29.6 was achieved in the practical test. Utilizing computational fluid dynamics simulations was found beneficial in the whole process.</p>	
Keywords	aerodynamics, computational fluid dynamics, simulation, motorsports, designing

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Tavoitteet ja rajaukset	4
2.1	Tavoitteet ajoneuvon suunnittelulle ja suunnitteluprosessille	4
2.2	Opinnäytetyön rajaus	5
3	Aerodynamiikka ajoneuvotekniikassa	7
3.1	Yleistä aerodynamiikasta	7
3.2	Ilmanvastus	8
3.3	Nostovoima	9
3.4	Negatiivinen nostovoima	10
3.5	Nostovoiman ja ilmanvastuksen suhde	13
3.6	Paineen keskipiste	14
3.7	Virtaustekniikan lakeja ja ilmiöitä ajoneuvotekniikassa	14
4	Kilpa-autojen aerodynaamiset komponentit	16
4.1	Siivet	16
4.2	Splitteri	18
4.3	Spoileri	18
4.4	Pohjalevy ja diffuusori	19
5	Tutkittava ajoneuvon lähtökohta	21
6	3D-mallinnus ja numeerinen virtausdynamiikan simulointi	22
6.1	Mallinnus	22
6.2	Numeerinen virtausdynamiikan simulointi	24
6.3	Simulaation tulokset	27
7	Suunnittelu	29
7.1	Vakiomalli	29
7.2	Ajokorkeus ja renkaat	31
7.3	Etulippa ja spoileri	32
7.4	Splitteri	35
7.4.1	Muoto	35

7.4.2	Korkeus ja kulma	36
7.5	Etupyörien ilmanohjaimet	38
7.6	Takasiipi	40
7.7	Säädettävyys	45
8	Valmistus	46
9	Käytännön kokeen suoritus	49
10	Tulosten analysointi	51
10.1	Simulaatiot	51
10.2	Käytännön koe	53
11	Yhteenveto ja johtopäätökset	56
	Lähteet	59

Lyhenteet

CFD	Numeerinen virtausdynamiikka (eng. Computational fluid dynamics)
C_D	Ilmanvastuskerroin
C_L	Nostovoimakkeroin
L/D	Nostovoiman ja ilmanvastuksen suhde
CoP	Paineen keskipiste (eng. Center of pressure)
GPS	Maailmanlaajuinen paikallistamisjärjestelmä (eng. Global Positioning System)

1 Johdanto

Tässä insinöörityössä tutkittiin Mazda Miata -ratapäiväauton aerodynaamisen suorituskyvyn parantamista numeerisen virtausdynamiikan simuloinnin avulla. Tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa aerodynaamisia parannuksia radalla ajettavaan harrasteautoon numeerisen virtausdynamiikan simuloinnin avulla käyttäen rajallista laskentatehoa ja työkaluja, joihin opiskelijalla tai harrastajalla on mahdollisuus päästä käsiksi. Opinnäytetyössä pyrittiin selvittämään, minkälaisia hyötyjä on mahdollista saavuttaa suhteellisen yksinkertaisilla muutoksilla käyttäen hyväksi yksinkertaista virtausdynamiikan simulointia.

Työ toteutettiin 3D-mallintamalla tutkittava ajoneuvo ja suorittamalla mallilla numeerisia virtausdynamiikan simulaatioita. Simulaatioiden numeeristen ja visuaalisten tulosten perusteella malliin suunniteltiin aerodynamiikkaa parantavia osia ja muutoksia. Suunnittelun jälkeen parannukset valmistettiin ja suoritettiin käytännön koe. Käytännön kokeessa pyrittiin selvittämään, paransivatko muutokset auton suorituskkyä Ahveniston moottoriradalla.

Insinöörityö tehtiin, koska haluttiin parantaa tutkittavan auton suorituskkyä aerodynaamisten muutosten avulla. Tutkitun auton suorituskkyä oli parannettu jo monilla keinoilla. Esimerkiksi auton moottorin tuottamaa tehoa oli kasvatettu ja pitoa parannettu alustan muutoksilla. Monien osa-alueiden parantaminen ennestään olisi kuitenkin ollut kallista ja monimutkaista. Uskottiin, että yksinkertaisilla aerodynamiikan muutoksilla olisi vielä mahdollista parantaa auton suorituskkyä kohtuullisin kustannuksin. Muutoksia ei haluttu tehdä vain arvausten tai muiden käyttäjien kokemusten perusteella, joten muutokset päätettiin suunnitella numeerisen virtausdynamiikan simuloinnin avulla.

Aerodynamiikka on näytellyt tärkeää roolia moottoriurheilussa jo pitkään ja aiheuttanut yhden suurimmista edistysaskeleista kilpa-autojen suorituskvyssä. Moottoriurheilun alkuaikoina aerodynaamista etulyöntiasemaa haettiin suunnittelemalla autoista mahdollisimman virtaviivaisia. Auton tuottaman ilmanvastuksen pienentäminen mahdollisti suuremman huippunopeuden ja kiihtyvyyden moottorin tehoa kasvattamatta. Virtaviivaiset ja vähän ilmanvastusta tuottavat autot alkoivat kuitenkin huippunopeuksien kasvaessa muuttua epävakaaiksi virtauksen aiheuttaman nostovoiman takia. Korin muotoilulla ja yksinkertaisilla siivekkeillä pyrittiin vähentämään

nostovoimaa ja helpottamaan autojen hallintaa suurissa nopeuksissa. Ensimmäisen suuren aerodynaamisen mullistuksen moottoriurheilussa aiheutti kuitenkin kuvassa 1 näkyvien ylösalaisten siipien kiinnittäminen kilpa-autoihin 1960-luvun loppupuolella. [1, s. 13–14.]



Kuva 1. Formula 1 -auto Lotus 49 vuodelta 1968. [2]

1970-luvulla Lotuksen Formula 1 -talli kehitti maaefektiä käyttävän auton, jossa osa auton pohjasta oli muotoiltu muistuttamaan ylösalaista siipeä. Maaefektin avulla on mahdollista saada ajoneuvo imeytymään radan pintaan erittäin voimakkaasti ja sen hyödyntäminen johti nopeasti aikaan, jolloin jotkin prototyyppiluokan autot kykenivät tuottamaan suurissa nopeuksissa jopa neljä kertaa massansa määrän negatiivista nostovoimaa. Ajoneuvojen tuottaman negatiivisen nostovoiman moninkertaistuminen johti lopulta autojen arvaamattomaan käytökseen joissain tilanteissa. Autot olivat niin riippuvaisia pohjan ja radan pinnan välillä luodusta negatiivisesta nostovoimasta, että pienikin häiriö näiden kahden välillä saattoi johtaa katastrofaalisiin seurauksiin. Esimerkiksi pohjan osuminen maahan saattoi aiheuttaa negatiivisen nostovoiman häviämisen ja johtaa ulosajoon. Sitten säännöillä on rajoitettu enemmän aerodynaamisten komponenttien käyttöä, jotta ajoneuvoilla voidaan kilpailla turvallisemmin. Vaikka säännöt aerodynamiikka koskien ovat nykyisin useissa kilpa-autoluokissa tiukat, jää esimerkiksi Formula 1:ssä aerodynamiikan suunnittelijalle vielä suhteellisen paljon vapauksia verrattuna muihin osa-alueisiin. Varsinkin Formula 1:n kaltaisissa suuren budjetin kilpa-autoluokissa pienelläkin aerodynaamisella

innovaatiolla on mahdollista saavuttaa ratkaiseva etu kilpailijoihin nähden. [1, s. 19–20.]

Kilpa-autoilun aerodynaamisen kehityksen alkuvaiheessa innovatiivinen ajattelutapa sekä yritys ja erehdys olivat ainoat työkalut aerodynamiikan kehittämiseen. Idea parannuksesta oli valmistettava ja koeajettava ennen kuin nähtiin, oliko idea onnistunut. Virtauksen aiheuttamien voimien laskeminen ennen tietokoneiden kehittymistä oli usein erittäin hankalaa ja virhemarginaalit olivat suuria. Käytännön kokeet olivat siis helpoin ja varmin tapa saada luotettavampia tuloksia. Virtauksen ja kappaleen vuorovaikutuksen tutkimiseen käytössä olevat työkalut ovat kuitenkin kehittyneet vuosien saatossa valtavasti ja nykyisin toimivat ideat on mahdollista optimoida erittäin tarkasti maksimaalisen suorituskyvyn saavuttamiseksi. [3, s. 55.]

Tuulitunnelien käytön yleistyessä 1970-luvulla kilpa-autojen suorituskyky parani huomattavasti aerodynaamisen suunnittelun kehityksen seurauksena. Tuulitunnelit mahdollistivat uusien ideoiden kokeilun kontrolloiduissa ja valvotussa ympäristössä ennen radalla testaamista. Tuulitunnelilla oli mahdollista tehdä kokeita eri mittakaavoissa ja nopeuksissa. Testattavien osien valmistaminen pienemmässä mittakaavassa säästi aikaa ja resursseja varsinkin niissä tapauksissa, joissa tarvittiin suuntaa-antavia tuloksia. Mittalaitteisto 1970-luvun tuulitunneleissa oli vielä suhteellisen alkeellista verrattuna nykyaikana saatavilla olevaan laitteistoon. Vaikka tuulitunneli vaikuttaakin erinomaiselta tavalta mitata aerodynamiikan luomia voimia ajoneuvoon, on sillä käytännössä mahdotonta simuloida virheettömästi oikeaa tilannetta kilpailussa. Todellisen tilanteen muuttujia, kuten vaihtelevaa tuulta, auton luistokulmaa, muuttuvaa radan pinnan materiaalia ja muotoa sekä muiden autojen aiheuttamia häiriöitä ilman virtauksessa on hyvin hankala simuloida tarkasti tuulitunnelissa. Puutteistaan huolimatta tuulitunneli on ollut ja tulee myös jatkossa olemaan tärkeä osa aerodynaamista suunnittelua. Se antaa suunnittelijalle mahdollisuuden tarkastella virtausta visuaalisesti ja mitata autoon kohdistuvia voimia, mikä oli ennen tuulitunneleita hankalaa. [3, s. 55.]

Tietotekniikan kehittyessä 2000-luvulle siirryttäessä on aerodynaamisessa suunnittelussa alettu käyttää enemmän hyväksi tietokonesimulaatioita. Numeerisella virtausdynamiikalla eli CFD:llä (eng. Computational Fluid Dynamics) tarkoitetaan tietokonesimulaatiota, jossa ohjelmisto simuloi nesteen tai kaasun virtausta ja virtauksen vuorovaikutusta kappaleisiin. Ajoneuvotekniikassa CFD-simuloinnilla voidaan suorittaa virtuaalisessa ympäristössä vastaavanlaisia kokeita kuin

tuulitunnelissa ilman kallista tuulitunnelia ja fyysistä testattavaa mallia. CFD on kuitenkin vain simulaatio. Jos tuulitunnelilla yritetään simuloida todellista tilannetta, jossa kilpa-auto on kilpailussa, niin CFD vie simulaation vielä yhtä askelta kauemmaksi todellisesta tilanteesta. CFD on kuitenkin erinomainen apuväline aerodynaamiseen suunnitteluun, sillä sen avulla säästetään kallista aikaa tuulitunnelissa ja ideoita on mahdollista testata ja optimoida ennen fyysisiä testejä. Modernissa suuren budjetin moottoriurheilussa onnistumiseen johtaa usein kaikkien työkalujen käyttö harmoniassa, ja CFD:tä käytetään usein tuulitunnelissa tehtävien kokeiden tukemiseen ja optimoimiseen. Tuulitunnelin käytön mittavien kulujen rinnalla CFD:n käytön ajatellaan usein olevan edullista, mutta suuri vaadittava laskentateho ja CFD:n mahdollistama rajattomien mittausten määrä tekee myös CFD:n käytöstä ammattitasolla erittäin kallista. CFD:n käyttäminen vaatii uudenlaista osaamista ja ammattilaisen säätämään simulaatiota sellaiseksi, että tulokset vastaavat mahdollisimman hyvin simuloitavaa tilannetta. Joissakin kilpasarjoissa niin tuulitunnelin kuin CFD:n käyttöä on rajattu säännöillä, joilla kontrolloidaan aerodynamiikan suunnitteluun käytettäviä resursseja. [1, s. 29; 3, s. 55.]

Muutaman viime vuoden aikana tietotekniikan kehitys ja kuluttajalle saatavissa olevan laskentatehon kasvaminen on mahdollistanut virtausdynamiikan simuloinnin myös harrastajalle.

2 Tavoitteet ja rajaukset

Opinnäytetyössä tutkittiin NA-mallisen Mazda Miatan aerodynaamiikkaa. Monet havainnot liittyivät tähän tiettyyn automalliin ja eivät välttämättä päde muiden ajoneuvojen kohdalla. Simulaatioita suoritettiin vain mainitun ajoneuvon mukaan tehdyillä 3D-malleilla. Mallit eivät vastanneet alkuperäistä ajoneuvoa täysin, sillä 3D-mallinnus tehtiin piirustusten perusteella.

2.1 Tavoitteet ajoneuvon suunnittelulle ja suunnitteluprosessille

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella auton suorituskykyä parantavia aerodynaamisia muutoksia virtausdynamiikan simuloinnin avulla. Amatööritasolla ei usein ole mahdollista suunnitella ja simuloida aerodynaamiikkaa tarkasti. Yleisin tapa parantaa ajoneuvon aerodynaamista suorituskykyä on etsiä kokeilemalla toimivia

ratkaisua tai käyttää muualla hyväksi todettuja osia tai muutoksia autossa. Tässä opinnäytetyössä tuotiin amatööritason aerodynamiikan suunnitteluun enemmän tehokkuutta ja optimointia. Tavoitteena oli virtausdynaamisen simuloinnin tarjoaman visuaalisen ja numeerisen datan avulla suunnitella parempi aerodynaaminen kokonaisuus verrattuna siihen, että autoon pultataan kiinni osia, joiden uskotaan parantavan suorituskykyä. Simuloinnin avulla voitiin vertailla ja optimoida ideoita ennen osien valmistamista, jolloin säästettiin aikaa ja resursseja.

Ajoneuvon suunnittelussa oli tavoitteena pitää muotoilu mahdollisimman yksinkertaisena, jolloin rajallisella laskentateholla ja virtausdynaamisen simuloinnin kokemuksella oli mahdollista päästä järkeviin lopputuloksiin. Erittäin tarkka virtausdynamiikan simulointi vaatii erityisen tarkkoja malleja ajoneuvosta ja testattavista osista, sekä paljon aikaa ja laskentatehoa. Harrastetasolla resurssit eivät usein riitä erittäin tarkkaan simulointiin, joten simuloinnin tuloksilla pyritään pääasiassa tukemaan aerodynaamista päättelyä, eikä tuloksiin luotettu sokeasti. Suunnittelussa vältettiin liian pieniin yksityiskohtiin paneutumista ja keskityttiin sellaisiin osa-alueisiin, joita simuloimalla oli mahdollista saada riittävän tarkkoja tuloksia.

Tässä työssä tärkein tavoite aerodynamiikan suunnittelussa oli kasvattaa ajoneuvon luomaa negatiivista nostovoimaa, kuitenkin antamatta ilmanvastuksen nousta liian suureksi. Tavoitteena oli myös saavuttaa aerodynaamisten muutosten myötä autoon lisää mukautuvuutta ja säädettävyyttä. Aerodynaamiikkaa muuttamalla voidaan saada auto käyttäytymään vakaammin varsinkin suuremmissa nopeuksissa ja auton tasapainoa ja ajettavuutta voidaan hienosäätää. Tavoitteena ei ollut luoda täysin optimoitua aerodynaamisesti täydellistä ajoneuvoa, vaan löytää mahdollisimman suuri yksinkertaisesti ja varmasti toteutettava parannus suorituskykyyn.

2.2 Opinnäytetyön rajaus

Ajoneuvon 3D-mallinnusta rajattiin siten, että mallinnus suoritettiin piirustusten perusteella ja mallin tarkkuus oli sellainen, että mallinnus oli mahdollista suorittaa kohtuullisessa ajassa. Mallinnusta rajattiin myös siten, että mallin oli oltava soveltuva virtausdynamiikan simulointiin. Malli ei saanut olla liian yksityiskohtainen, jotta simulaatioiden suoritukseen kuluva aika ei kasvanut liian suureksi.

Ajoneuvon suunnittelua rajattiin siten, että muutosten jälkeen ajoneuvoa oli pystyttävä käyttämään liikenteessä normaalisti. Ajoneuvo ei saanut olla liian matala, leveä tai muuten liikenteessä huomiota herättävä. Ajoneuvon oli myös oltava palautettavissa alkuperäiseksi kohtuullisella vaivalla. Suunniteltavien osien oli oltava irrotettavia, ja ajoneuvon paneeleihin tai koriin ei tehtäisi kiinnikkeitä lukuun ottamatta pysyviä muutoksia. Suunnittelu rajattiin myös noudattamaan Suomen Time Attack -sarjan club-luokan aerodynaamisia muutoksia rajoittavia sääntöjä. Ajoneuvolla tullaan mahdollisesti kilpailemaan kyseisessä luokassa, joten aerodynaamiset muutokset pidettäisiin Time Attackin sääntökirjan mukaisina:

Etusiipi saa ulottua korilinjasta eteenpäin maksimissaan 50 mm:n päähän, leveyssuunnassa se ei saa ylittää korilinjaa ja se saa ulottua taaksepäin korkeintaan etuakseliin asti.

Diffuusori saa ulottua korilinjasta taaksepäin maksimissaan 50 mm:n päähän, sen on oltava kuitenkin korin maksimileveyden sisällä ja se saa ulottua eteenpäin korkeintaan taka-akseliin asti.

Etusiiveke (canard) saa olla puskurista maksimissaan 50 mm sivulle, tämä tulee kuitenkin olla korilinnan maksimileveyden sisällä.

Takasiivekettä ei saa olla.

Takaspoilerin maksimikorkeus on sedanissa +0 mm, farmareissa ja tasaperäisissä (hatchback) +150 mm korilinnan yläpuolella. Takaspoileri ei saa olla leveämpi kuin korilinja, eikä ulottua sen ulkopuolelle.

Pohjalevyt ovat kiellettyjä. [4, s. 11.]

Simulaatioiden suorittamiseen, osien suunnitteluun ja osien valmistamiseen käytettävää aikaa rajattiin siten, että tammikuussa 2017 aloitettu suunnitteluprosessi saataisiin valmiiksi ennen käytännön koetta toukokuussa 2017.

Valmistettavien osien kustannusten oli oltava ajoneuvon käyttötarkoitus huomioiden järkeviä ja osat oli valmistettava niin yksinkertaisesti, että mahdollisesti vaurioituessaan osan tilalle olisi mahdollista valmistaa uusi osa kohtuullisella vaivalla.

Opinnäytetyössä käytetyt tutkintatavat rajattiin numeerisen virtausdynamiikan simulointiin, simulaatioiden tulosten analysointiin ja lopuksi tehtyyn käytännön kokeeseen Ahveniston moottoriradalla. Esimerkiksi minkäänlaisia tuulitunnelitestejä ei suoritettu.

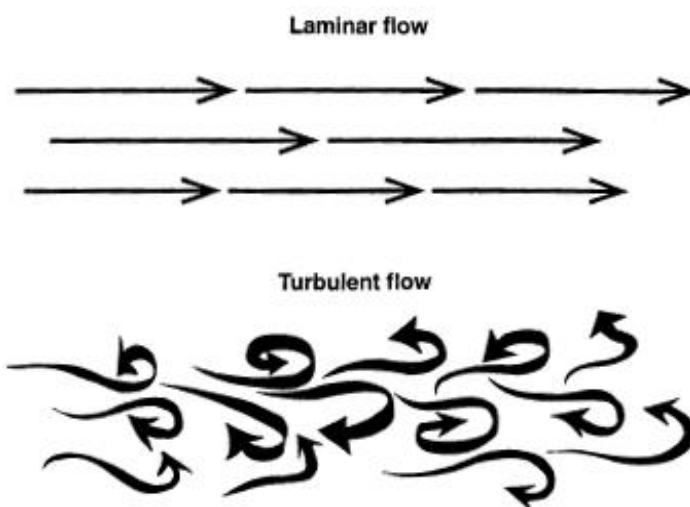
Opinnäytetyön aikana suoritettiin kahdella tietokoneella satoja simulaatioita, joiden kestot vaihtelivat neljän ja kahdeksan tunnin välillä. Tässä raportissa tutustutaan vain kaikista tärkeimpien ja oleellisimpien simulaatioiden tuloksiin.

3 Aerodynamiikka ajoneuvotekniikassa

3.1 Yleistä aerodynamiikasta

Aerodynamiikalla tarkoitetaan virtaustekniikan osa-aluetta, joka tutkii ilman ja kappaleen vuorovaikutusta niiden liikkeessä toistensa suhteen. Ajoneuvotekniikan yleisimmässä tapauksessa ajoneuvo liikkuu staattisen ilmamassan läpi. Vastaava tilanne saadaan aikaan tutkittaessa ajoneuvon aerodynamiikkaa myös päinvastaisena. Tuulitunnelissa kohdistetaan ilmavirta staattiseen ajoneuvoon ja näin simuloidaan ajoneuvon liikettä ilman läpi.

Virtaus ajoneuvon ympärillä voidaan jakaa laminaariseen ja turbulenttiseen virtaukseen (kuva 2). Laminaarisessa virtauksessa virtaus liikkuu yhteen suuntaan tehokkaasti ja organisoidusti. Turbulenttisessa virtauksessa virtaus pyörteilee ja liikkuu eri suuntiin. Virtaus ajoneuvon ympärillä pyritään pitämään laminaarisena, sillä laminaarinen virtaus pitää vastuksen pienempänä. Virtauksen irtoaminen pinnalta johtaa usein virtauksen muuttumiseen turbulenttiseksi. Turbulenttinen virtaus kasvattaa vastusta, mikä on haitallista ajoneuvon aerodynaamisen tehokkuuden kannalta. [3, s. 26.]



Kuva 2. Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus kuvattuna visuaalisesti. [2, s. 27]

Kappaleen liikkuesssa ilmamassan läpi joutuu ilmamassa väistymään kappaleen tieltä ja virtaamaan kappaleen ohi sen pintoja pitkin. Eri nopeudella kulkeva virtaus kappaleen pintojen läheisyydessä luo pinnoille paine-eroja, jotka aiheuttavat kappaleeseen vaikuttavia voimia. Ajoneuvotekniikassa kaksi keskeisintä virtauksesta johtuvaa kappaleeseen vaikuttavaa voimaa ovat ilmanvastus ja nostovoima. [3, s. 45]

3.2 Ilmanvastus

Ilmanvastuksella tarkoitetaan ilman virtauksen aiheuttamien kappaleen etenemistä vastustavien voimien summaa, eli kuinka suuri voima vastustaa ajoneuvon liikettä ilmamassan läpi. Suurempi vastus heikentää ajoneuvon suorituskykyä ja energiatehokkuutta, joten ajoneuvotekniikassa pyritään usein ilmanvastuksen minimoimiseen. Joskus ilmanvastuksen kanssa joudutaan kuitenkin tekemään kompromisseja, esimerkiksi tavoiteltaessa suurta määrää negatiivista nostovoimaa. [3, s. 45.]

Kappaleen tuottama ilmanvastus saadaan kaavasta

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A \quad (1)$$

jossa

F_D	on ilmanvastus	
ρ	on ilman tiheys	
v	on kappaleen nopeus suhteessa ilmaan	
C_D	on ilmanvastuskerroin	
A	on kappaleen otsapinta-ala, eli pinta-ala virtauksen suunnasta katsottuna	[3, s. 47].

Ilmanvastuskerroin on koosta riippumaton kappaleen muodosta kertova kerroin, joka kuvaa kappaleen luomaa ilmanvastusta. Pallon ilmanvastuskerroin on noin 0,47 ja kuution noin 1,05. Seuraavalla sivulla on esimerkkejä erilaisten ajoneuvojen suuntaa antavista ilmanvastuskertoimista. [1, s. 57; 3, s. 50; 5, s. 394]:

C_d	Ajoneuvo
0,32	Hybridi tai sähköauto jonka ilmanvastuskerroin on pyritty minimoimaan
0,43	Normaali henkilöauto
0,70	Kuorma-auto
0,75	Prototyyppiluokan kilpa-auto
0,71	Indycar (Superspeedway)
1,10	Indycar (road course)
1,07	Formula 1

Ajoneuvon ilmanvastukseen voidaan vaikuttaa muuttamalla ajoneuvon otsapinta-alaa tai ilmanvastuskerrointa. Ajoneuvon otsapinta-alaa voidaan harvoin pienentää pelkistä aerodynaamisista syistä, joten usein ilmanvastusta yritetään laskea suunnittelemalla auton korista mahdollisimman sulavalinjainen. Sulavat muodot, joita virtaus seuraa häiriintymättä auttavat pienentämään ilmanvastuskerrointa. Kulmikkaat muodot aiheuttavat helposti virtauksen irtoamisen korin pinnasta, jolloin syntyy vastusta kasvattavaa turbulenttista virtausta.

Kaavasta nähdään, että vastus kasvaa nopeuden neliöön. Ilmanvastuskertoimella ja otsapinta-alalla on siis sitä suurempi merkitys ajoneuvon suorituskykyyn, mitä suuremmalla nopeudella liikutaan. Ajoneuvo, jonka ilmanvastuskerroin on 0,5 ja otsapinta-ala 2 m², tuottaa vastusta vauhdissa 100 km/h 473 N ja vauhdissa 200 km/h 1893 N.

Kappaleen ilmanvastuskerroin voidaan laskea ilmanvastuksen kaavasta johdetulla kaavalla

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho v^2 A} \quad (2)$$

3.3 Nostovoima

Nostovoimalla tarkoitetaan kappaleeseen kohdistuvien pystysuuntaisten ilman virtauksen aiheuttamien voimien summaa. Jos virtaus kappaleen pintojen läheisyydessä luo kappaleen yläpuolelle matalamman paineen ja alapuolelle

korkeamman paineen, syntyy ylöspäin vaikuttava nostovoima. Jos tilanne on päinvastainen, vaikuttaa ajoneuvoon alaspäin suuntautunut nostovoima, jota kutsutaan negatiiviseksi nostovoimaksi. [3, s. 2.]

Ilman virtauksen kappaleeseen aiheuttama nostovoima saadaan kaavasta

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L \quad (3)$$

jossa

L	on nostovoima	
ρ	on ilman tiheys	
v	on kappaleen nopeus suhteessa ilmaan	
S	on siipipinta-ala eli kappaleen pinta-ala ylhäältä katsottuna	
C_L	on nostovoimakerroin	[3, s. 47].

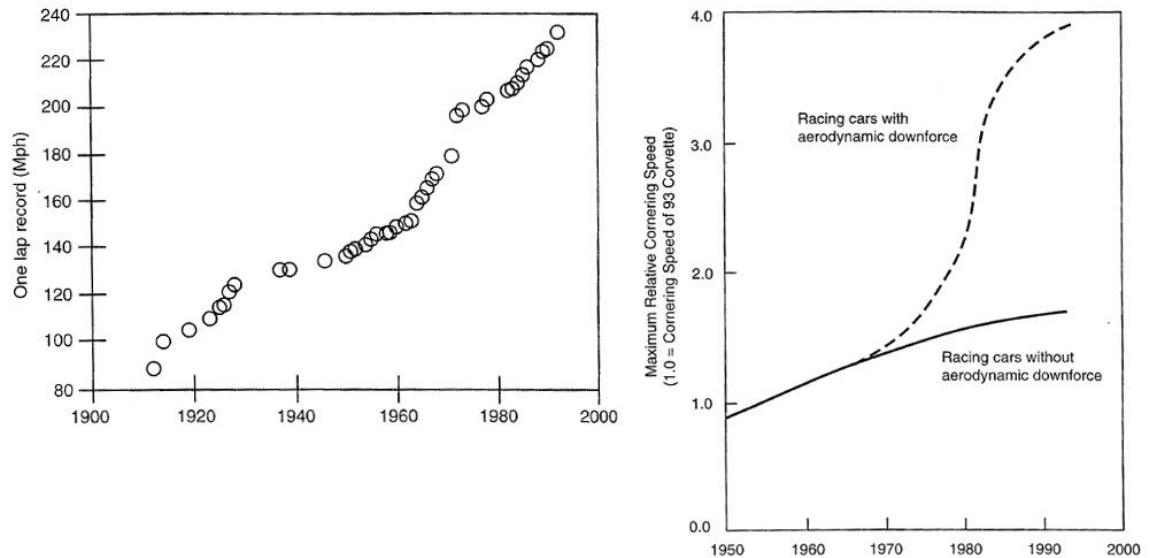
Kaavasta nähdään, että vastuksen tavoin nostovoima kasvaa nopeuden neliöön, eli myös nostovoiman merkitys kasvaa sitä suuremmaksi mitä suuremmalla nopeudella liikutaan.

Nostovoimakerroin, joka on ilmanvastuskerrointa vastaava koosta riippumaton kerroin nostovoimalle, saadaan nostovoiman kaavasta johdetusta kaavasta

$$C_L = \frac{2L}{\rho v^2 S} \quad (4)$$

3.4 Negatiivinen nostovoima

Kilpa-autoilussa aerodynamiikan suunnittelulla tähdätään usein negatiivisen nostovoiman kasvattamiseen. Negatiivinen nostovoima on tehnyt kilpa-autoista huomattavasti nopeampia sen hyödyntämisen keksimisen jälkeen. Kuvan 3 kuvaajissa nähdään vasemmalla kierrosennätyksen keskinopeuden kehitys Indianapoliksen Superspeedway- radalla eri aikakausilla ja oikealla mutkanopeuksien kehitys ajoneuvoilla, jotka hyödyntävät ja ajoneuvoilla, jotka eivät hyödynnä negatiivista nostovoimaa. Molemmissa kuvaajissa nähdään huomattava harppaus negatiivisen nostovoiman hyödyntämisen keksimisen jälkeen 1960-luvun loppupuolella.



Kuva 3. Vasemmalla Indianapolis Superspeedway-radan kierrosennätyksen keskinopeuden kehitys ja oikealla kilpa-autojen mutkanopeuksien kehitys. [3, s. 4–5]

Negatiivisen nostovoiman hyödyntäminen kilpa-autoilussa perustuu siihen, että virtauksen aiheuttamia voimia hyväksikäyttämällä voidaan parantaa ajoneuvon ja radan pinnan välistä pitoa ja sitä kautta saavuttaa nopeampia kierrosaikoja. Negatiivisen nostovoiman vaikutusta pitoon voidaan havainnollistaa yksinkertaistettuna tutkimalla joitakin ajoneuvon mutkassa vaikuttavia voimia.

Ajoneuvon mutkassa kohdistuva keskipakoisvoima saadaan kaavasta

$$F_c = \frac{mv^2}{r} \quad (5)$$

jossa

F_c on keskipakoisvoima
 m on ajoneuvon massa
 v on nopeus
 r on mutkan säde

[6]

Kaavasta nähdään, että mitä suurempaa nopeutta mutkassa ajetaan ja mitä suurempi massa ajoneuvolla on, niin sitä suurempi ajoneuvoa pois ajolinjalta pakottava keskipakoisvoima syntyy. Jotta ajoneuvo pysyy r-säteisellä kääntyvällä ajolinjalla, pitää olla olemassa vähintään keskipakoisvoiman suuruinen voima, joka estää ajoneuvon liukumista radan pinnalla. Tästä voimasta käytetään nimitystä kitkavoima ja se saadaan kaavasta

$$F_{fric} = \mu N \quad (6)$$

jossa

F_{fric}	on kitkavoima	
μ	on kitkakerroin	
N	on normaalivoima ajoneuvon ja maan välillä	[6]

Jos samalla ajoneuvolla ajetaan r-säteisteen mutkaan suuremmalla nopeudella, niin kasvaa ajoneuvon kohdistuva keskipakoisvoima. Jotta ajoneuvo pysyy ajolinjalla suuremmalla nopeudella, niin tarvitaan suurempi kitkavoima. Kitkavoimaa voidaan kasvattaa muuttamalla ajoneuvon ja maan välistä kitkakerrointa tai normaalivoimaa. Kitkakertoimen osuutta kitkavoimasta voidaan kutsua kilpa-autoilussa mekaaniseksi pidoksi. Siihen vaikuttavat esimerkiksi ajoneuvossa käytettävät renkaat ja ajoneuvon alustan toiminta. Normaalivoimaa voidaan kasvattaa nostamalla ajoneuvon massaa tai luomalla aerodynaamisen suunnittelun avulla virtauksen aiheuttama alaspäin suuntautuva voima. Keskipakoisvoiman kaavasta nähdään, että massan kasvattaminen kasvattaa myös keskipakoisvoimaa, joten massaa kasvattamalla ei saavuteta suurempaa mutkanopeutta. Virtauksen aiheuttama negatiivinen nostovoima kasvattaa normaalivoimaa vaikuttamatta ajoneuvon massaansa. Näin kitkavoima kasvaa ja nopeutta voidaan nostaa siihen asti, että keskipakoisvoima vastaa kitkavoimaa. Renkaiden ominaisuuksien takia normaalivoima ei kasvata kitkavoimaa lineaarisesti. Mitä enemmän normaalivoimaa lisätään, niin sitä vähemmän se kasvattaa kitkavoimaa.

Negatiivisesta nostovoimasta on muutakin hyötyä kuin sivuttaisen kitkavoiman kasvattaminen mutkissa. Koska ajoneuvon kitkavoima kasvaa myös pituus suunnassa, voidaan ajoneuvolla kiihdyttää aikaisemmin ulos mutkista ja vastaavasti jarruttaa myöhemmin. Suuremman kitkavoiman myötä kasvanut mutkanopeus saa aikaan suuremman ulostulonopeuden mutkista. Vaikka ilmanvastus usein kasvaa suuremman negatiivisen nostovoiman myötä, suurempi ulostulonopeus mutkista kompensoi

menetystä suoranopeuksissa. Negatiivisesta nostovoimasta ei siis ole hyötyä vain pitkissä suurinopeuksisissa mutkissa, vaan hyöty kertyy koko kierroksen aikana. Negatiivisen nostovoiman kasvattama pito vähentää pidemmissä kilpailuissa myös renkaiden kulumista, sillä renkaat joutuvat luistamaan vähemmän.

Kilpa-autoissa joudutaan usein tekemään kompromisseja aerodynamiikan suhteen. Negatiivisen nostovoiman luominen kasvattaa suorituskyykyä mutkissa, mutta samalla vastus nousee ja suorituskyyky suorilla laskee. Negatiivisen nostovoiman ja vastuksen välinen suhde täytyy siis valita ajoneuvon, radan ja vallitsevien olosuhteiden mukaan. Esimerkiksi indycar-luokassa on kaksi erillistä aerodynamiikkapakettia korkea nopeuksille Superspeedway-ovaaleille ja normaaleille kilparadoille.



Kuva 4. 2018 vuoden Indycar auton aerodynamiikkapaketit. Vasemmalla Superspeedway ja oikealla road course. [7]

3.5 Nostovoiman ja ilmanvastuksen suhde

Nostovoiman ja ilmanvastuksen suhde, joka on simulaatioiden tuloksissa ilmoitettu merkinnällä L/D (Lift / Drag), kertoo ajoneuvon aerodynaamisesta tehokkuudesta. Mitä suurempi negatiivinen arvo nostovoiman ja ilmanvastuksen suhteella on, sitä enemmän negatiivista nostovoimaa ajoneuvo tuottaa suhteessa ilmanvastukseen. Alla on esimerkkejä ajoneuvojen nostovoiman ja ilmanvastuksen suhteista. [3, s. 50.]:

Henkilöauto	0,2:1
Gt-luokan kilpa-auto	-0,6:1
Formula 1	-3:1
Prototyypiluokan auto	-5:1

Usein oletetaan, että Formula 1 -auton nostovoiman ja vastuksen suhde on korkein kilpa-autoilussa. Vaikka Formula 1 -auto tuottaa erittäin paljon negatiivista nostovoimaa, niin sen avoimet pyörät ja suuret siivet nostavat vastusta niin paljon, että nostovoiman ja vastuksen suhde ei ole niin hyvä kuin prototyyppiluokan autoissa. Esimerkiksi Le Mansin 24 tunnin kilpailussa käytettävissä prototyyppiluokan autoissa on aerodynamiikan suunnittelussa otettava mutkanopeuksien lisäksi huomioon huippunopeus pitkillä suorilla, sekä vastuksen kanssa kasvava polttoaineen kulutus. Pienemmän vastuksen takia prototyyppiluokan auton nostovoiman ja vastuksen suhde on parempi kuin Formula 1 -autolla.

3.6 Paineen keskipiste

Paineen keskipiste, josta tämän raportin mittaustuloksissa käytetään lyhennettä CoP (Center of Pressure), kertoo pisteen, jonka läpi virtauksen pinnalle luoman paineen aiheuttamien pystysuuntaisten voimien resultantti kulkee. Tässä raportissa paineen keskipiste ilmaistaan mittana ajoneuvon keulasta. Tutkittavan auton tapauksessa paineen keskipisteen ollessa 1,93 m jakautuu nostovoima tasan etu- ja taka-akseleille. Paineen keskipisteen ollessa alle 1,93 m kohdistuu enemmän nostovoimaa ajoneuvon etuakselille, ja sen ollessa yli 1,93 m taka-akselille. Paineen keskipiste voi sijaita myös ajoneuvon ulkopuolella. Esimerkiksi tapauksessa, jossa ajoneuvon takapää tuottaa positiivista nostovoimaa ja etupää negatiivista nostovoimaa, voi paineen keskipiste sijaita metrejä ajoneuvon edessä. [8]

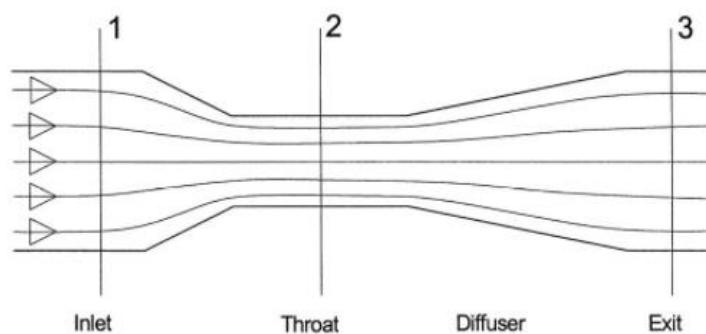
Paineen keskipisteen muutoksella voidaan vaikuttaa huomattavasti ajoneuvon käyttäytymiseen eri tilanteissa ja nopeuksissa. Esimerkiksi säätämällä paineen keskipiste ajoneuvon painopisteen takapuolelle, voidaan ajoneuvo säätää mekaanisen pidon avulla kääntymään hyvin hitaissa mutkissa, ja olemaan samalla vakaa suurinopeuksisissa mutkissa negatiivisen nostovoiman taka-akselille lisäämän pidon takia. Paineen keskipiste ja negatiivisen nostovoiman suhde etu- ja taka-akselien välillä on aina säädettävä ajoneuvon, radan ja muiden vallitsevien olosuhteiden mukaan.

3.7 Virtaustekniikan lakeja ja ilmiöitä ajoneuvotekniikassa

Jotta ymmärretään ajoneuvojen ja aerodynaamisten komponenttien toimintaa, on tarpeellista tutustua muutamaan virtaustekniikan lakiin ja ilmiöön.

Bernoullin laki on fysiikan laki, jonka mukaan virtauksen nopeuden kasvaessa paine alenee. Bernoullin lain mukaan suljetussa putkessa aineen kokonaisenergia on vakio. Staattisessa tilanteessa ei ole liikettä, joten kokonaisenergia koostuu vain paineesta. Jos samassa suljetussa järjestelmässä esiintyy virtausta, on aineella myös kineettistä energiaa. Koska kokonaisenergian on oltava vakio, aiheuttaa virtaavan aineen kineettinen energia sen, että paineen on oltava pienempi kuin staattisessa tilanteessa. [1, s. 39]

Venturi-ilmiö on Bernoullin lakiin läheisesti liittyvä ilmiö, jonka mukaan putken halkaisijan pienentyessä virtausnopeus kasvaa. Koska putken läpi virtaavan kaasun tai nesteen tilavuus ja virtausmäärä pysyvät samana, on virtauksen nopeuden oltava suurempi putken halkaisijan pienentyessä. Venturi-ilmiötä voidaan havainnollistaa kuvassa 5 olevalla venturiputkella. [1, s. 41–42]



Kuva 5. Venturi-putki. [1, s. 41]

Aineen häviättömyyden laki määrää virtaavan aineen ollessa puristumatonta, että massavirtaus aikayksikköä kohti pysyy vakiona kuvan tapauksessa:

$$\rho V_1 A_1 = \rho V_2 A_2 = \rho V_3 A_3 \quad (7)$$

Kaavassa ρ on aineen tiheys, V on virtauksen nopeus ja A on putken poikkileikkauksen pinta-ala.

Coandă-ilmiöllä tarkoitetaan virtauksen ajautumista kohti sitä lähellä olevaa pintaa. Coandă-ilmiön mukaan virtaus siis pyrkii seuraamaan pintaa irtoamatta siitä. Kuvassa 5 on demostroitua Coandă-ilmiötä käytännössä. Virtaava vesi seuraa pyöreän lusikan pintaa ja virtauksen suunta muuttuu. [1, s. 30–31.]



Kuva 6. Coandă-ilmiö.

4 Kilpa-autojen aerodynaamiset komponentit

Ajoneuvon korin muodon lisäksi kilpa-autoilussa käytetään aerodynamiikkaa avustavia komponentteja, joilla ei usein ole muuta funktiota, kuin aerodynamiikan parantaminen. Aerodynamiikan suunnittelu on edennyt niin pitkälle, että joissakin kilpaluokissa jopa alustan tukivarret on suunniteltu toimimaan aerodynaamisina komponentteina.

4.1 Siivet

Yksinkertaisuudessaan kilpa-autoihin asennettavat siivet muistuttava ylösalaisin asennettuja lentokoneen siipiä, joilla luodaan negatiivista nostovoimaa. Siipien toiminta perustuu siihen, että virtaus kulkee nopeammin siiven alapuolelta kuin yläpuolelta. Nopeampi virtaus aiheuttaa siiven alapuolelle matalamman paineen kuin siiven yläpuolelle, jolloin syntyy negatiivinen nostovoima. Siiven poikkileikkauksen profiili määrittää, kuinka paljon ilmanvastusta ja negatiivista nostovoimaa siipi luo. Kilpa-autoissa voidaan käyttää myös monielementtisiä siipiä, joissa virtaus edelliseltä elementiltä ohjataan seuraavan, yleensä suuremmassa kulmassa olevan elementin alapuolelle. Monielementtisellä siivellä voidaan luoda paljon negatiivista nostovoimaa tuottava siipi, jonka vastus on pienempi kuin vastaavan negatiivisen nostovoiman tuottavan yksielementtisen siiven. [1, s. 150–152.]

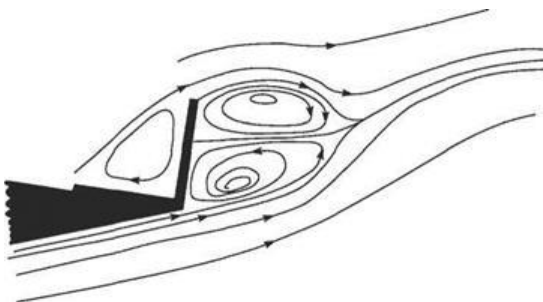
Takasiipi asennetaan usein taka-akselin takapuolelle takaluukun päälle (kuva 7). Yleisimmin kilpa-autoilussa käytetyt takasiivet ovat niin sanottuja 2D-siipiä. 2D-siivessä

siiven poikkileikkauksen profiili on sama koko siiven matkalla. 3D-siivessä siiven poikkileikkauksen profiili muuttuu siiven eri kohdissa. Yleisimmin 3D-siipeä käytetään, kun joudutaan asentamaan siipi niin alas, että ajoneuvon yli kulkeva virtaus vaikuttaa siiven toimintaan. Tällöin takasiipi muotoillaan ajoneuvon muodon mukaan ja siiven muotoilussa otetaan huomioon, millaisella nopeudella ja millaisessa kulmassa virtaus saapuu ajoneuvon yli siivelle.



Kuva 7. Time Attack -auto Nissan Silvia S15. [9]

Gurney-laippa on siiven takaosaan asennettava ilmanohjain, jonka avulla voidaan parantaa siiven luomaa negatiivista nostovoimaa. Gurney-laipan taakse muodostuu matalan paineen alue, joka imee virtausta siiven alalaidasta ja auttaa estämään virtauksen irtoamista siiven alalaidasta. Gurney-laippa luo vastusta ja heikentää usein siiven nostovoiman ja vastuksen suhdetta. Gurney-laippa on kuitenkin hyödyllinen, sillä sen avulla siiven ominaisuuksia voidaan hienosäätää muuttamatta koko siiven profiilia. Kuvassa 8 on havainnollistettu, miten virtaus käyttäytyy gurney-laipan läheisyydessä. [1, s. 213.]



Kuva 8. Gurney-laippa siiven takaosassa. [10]

Etusiipiä käytetään useimmiten avopyöräisissä autoissa auton etupäässä etuakselin edessä (kuva 4). Etusiipi toimii samalla perusperiaatteella kuin takasiipi, mutta usein

sen tehtävänä on negatiivisen nostovoiman luomisen lisäksi ohjata virtausta vastusta luovien etupyörien yli ja ohi. Koska etusiipi on usein matalalla, on etusiiven aerodynamiikka vuorovaikutuksessa myös radan pinnan kanssa. Kun etusiiven alta kulkeva virtaus joutuu kulkemaan radan pinnan ja siiven välissä, kasvaa virtauksen nopeus venturi-ilmiön mukaisesti. Samalla paine siiven alla laskee ja siipi luo enemmän negatiivista nostovoimaa kuin korkeammalla oleva siipi. Tätä maan ja aerodynaamisen komponentin välistä vuorovaikutusta kutsutaan maaefektiksi. [3, s. 234–235.]

4.2 Splitteri

Splitteri on ajoneuvon etuosan alle asennettava aerodynaaminen komponentti, jolla luodaan negatiivista nostovoimaa. Nimensä mukaan splitteri jakaa virtausta ajoneuvon ylä- ja alapuolelle. Sen avulla estetään virtauksen ohjautuminen ajoneuvon alle. Nopea virtaus splitterin ja maan välillä luo matalampaa painetta splitterin alle ja puskurista alaspäin kääntyvä virtaus korkeampaa painetta splitterin päälle. Kuvassa 7 on Time Attack -autoon asennettu suuri splitteri. [1, s. 110, 112.]

4.3 Spoileri

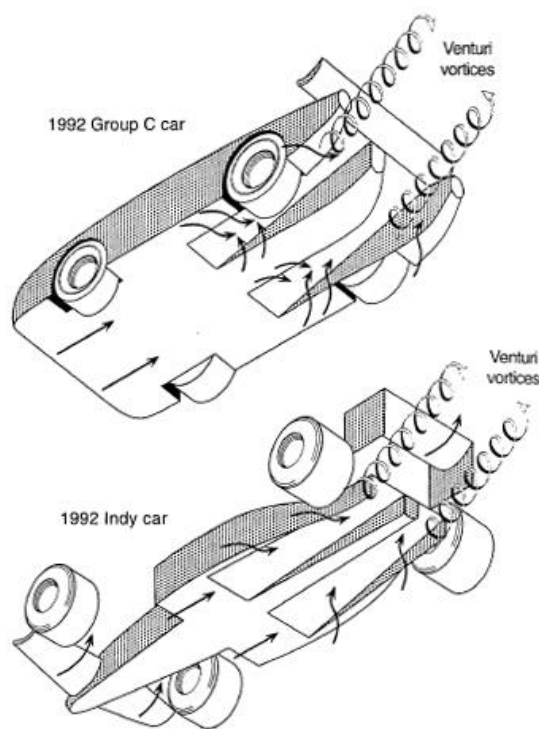
Spoileri on henkilöautoissakin käytetty ajoneuvon takaosaan asennettava ilmanohjain. Spoilerin pääasiallinen tarkoitus ei ole luoda suuria määriä negatiivista nostovoimaa, vaan ohjata virtausta ajoneuvon takaosassa ja estää näin nostovoiman syntymistä. Yleisimmin spoileria käytetään takaluukun päällä estämässä virtauksen Coandă-ilmiön mukaista taittumista takaluukulta alaspäin. Kun virtaus ohjataan takaluukun päältä ylöspäin, ajoneuvon takaosassa muodostuva nostovoima ja ilmanvastus pienenevät. [3, s. 139–140]



Kuva 9. Spoileri Audi A4 –henkilöautossa. [11]

4.4 Pohjalevy ja diffuusori

Pohjalevyä ja diffuusoria käytetään negatiivisen nostovoiman luomiseen ajoneuvon alla. Tarkoitus on ajoneuvon pohjan muodon avulla luoda matalampaa painetta ajoneuvon ja maan väliin kiihdyttämällä ajoneuvon alla kulkevan virtauksen nopeutta. Auton pohjan ja maan väli pyritään luomaan muistuttamaan venturiputkea. Pohjalevyn muotoilu on nykyisin rajattu tiukasti säännöillä, ja useissa kilpaluokissa joudutaan käyttämään tasaista pohjalevyä etu- ja taka-akselien välissä. Kun säännöt pohjan muotoilun suhteen olivat avoimempia, voitiin koko pohjan muotoilussa ottaa huomioon aerodynaaminen hyöty. Prototyypiluokan autoissa ja formuloissa nähtiin suuria tunneleita, joiden avulla luotiin matalampaa painetta ajoneuvon alle (kuva 10). Ajoneuvon ja maan välissä on mahdollista luoda negatiivista nostovoimaa tehokkaasti, sillä tällöin ilmanvastus kasvaa usein vähemmän, kuin jos vastaava negatiivinen nostovoima luotaisiin esimerkiksi siivillä. Maaefektin vapaassa käytössä on kuitenkin riskejä, jotka lopulta johtivat sen käytön rajoittamiseen säännöillä. Esimerkiksi ajokorkeuden muutokset luovat suuria eroja siihen, kuinka paljon negatiivista nostovoimaa ajoneuvo milloinkin tuottaa. Auton pohjan osuminen maahan saattoi aiheuttaa niin suuren häiriön negatiivisen nostovoimaan, että kuljettaja menetti auton hallinnan. [3, s. 253–256.]



Kuva 10. Esimerkkejä maaefektiä käyttävien autojen pohjista. [3, s. 204]

Diffusorilla tarkoitetaan ajoneuvon pohjan loppuosaa, jossa virtauksen nopeus hidastetaan progressiivisesti takaisin ympäröivään virtauksen nopeuteen. Moderneissa kilpa-autoissa, joissa säännöt vaativat tasaisen pohjalevyn käyttöä on diffusori selkeästi erottuva osa ajoneuvon perässä (kuva 11). Diffusori auttaa pitämään virtauksen nopeuden ajoneuvon alla mahdollisimman korkeana mahdollisimman pitkään ja oikein suunniteltu diffusori kasvattaa koko pohjan luomaa negatiivista nostovoimaa. Diffusori ja koko pohjan aerodynamiikka toimii sitä tehokkaammin, mitä lähempänä maanpintaa ajoneuvon pohjalevy on. Tällöin virtauksen nopeus ajoneuvon pohjan ja maan välissä on mahdollisimman suuri. [1, s. 254.]



Kuva 11. Suuri diffuusori Porsche 911 RSR- kilpa-autossa. [12]

5 Tutkittava ajoneuvon lähtökohta

Tutkittava ajoneuvo on vuosimallin 1991 NA-mallinen Mazda Miata, joka on muokattu sopimaan sekä liikenne- että ratakäyttöön. Mazda Miata on yksi maailman yleisimmistä amatööri- ja harrastetasolla käytetyistä kilpa-autoista. Automallilla on ollut ja on edelleen omia mallikohtaisia kilpasarjoja eri puolilla maailmaa. Auto on erityisen suosittu varsinkin Amerikassa edullisen hinnan, luotettavuuden ja hienostuneen alustaratkaisun takia.

Tutkittavaan autoon on asennettu mekaaninen ahdin, joka kasvattaa moottorin tuottaman tehon alkuperäisestä 116 hevosvoimasta 190 hevosvoimaan. Rata-ajettavuuden parantamiseksi autoon on asennettu lukittuva tasauspyörästö, säädettävä alustasarja, jäykemmät tukivarsien helat ja alkuperäistä suuremmat nelimäntäiset jarrut. Auto painaa noin 1050 kiloa ilman kuljettajaa. Autolla on ajettu rata-ajoa kolme vuotta ja sinä aikana auto on saatu tekniikan ja alustan osalta säädettyä luotettavaksi ja johdonmukaiseksi.

Ennen opinnäytetyön aloittamista ajoneuvon aerodynamiikka ei ollut täysin alkuperäinen. Positiivisia tuloksia tuottaneet aerodynamiikan kokeilut olivat yksi syy sille, miksi ajoneuvon aerodynamiikkaa lähdettiin kehittämään lisää. Ajoneuvossa on useamman vuoden ajan ollut takaluukun päällä spoileri ja etupuskurin alla lippa sekä pieni splitteri. Edellä mainitulla kokoonpanolla ajoneuvo käyttäytyi yliohtautuvasti

suuremmissa nopeuksissa. Koska muuta syytä ajoneuvon ylihjautuvalle käytökselle ei löydetty, päätettiin auton aerodynaamisen tasapainon siirtyneen liian eteen splitterin asentamisen jälkeen. Takaluukun päälle rakennettiin säädettävä suuri spoileri, jonka avulla saatiin auton aerodynaamista tasapainoa siirrettyä taaksepäin (kuva 12). Spoileri osoittautui toimivaksi ratkaisuksi, ja auto saatiin käyttäytymään kovemmissa nopeuksissa aikaisempaa vakaammin.



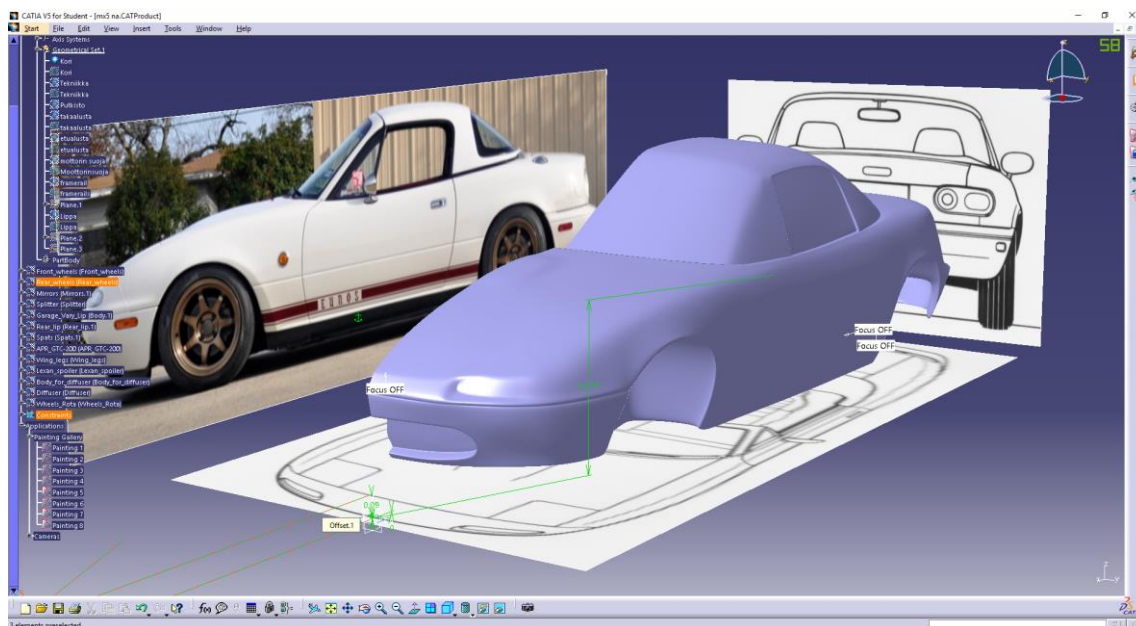
Kuva 12. Säädettävä spoileri, jota käytettiin autossa kaudella 2016.

6 3D-mallinnus ja numeerinen virtausdynamiikan simulointi

6.1 Mallinnus

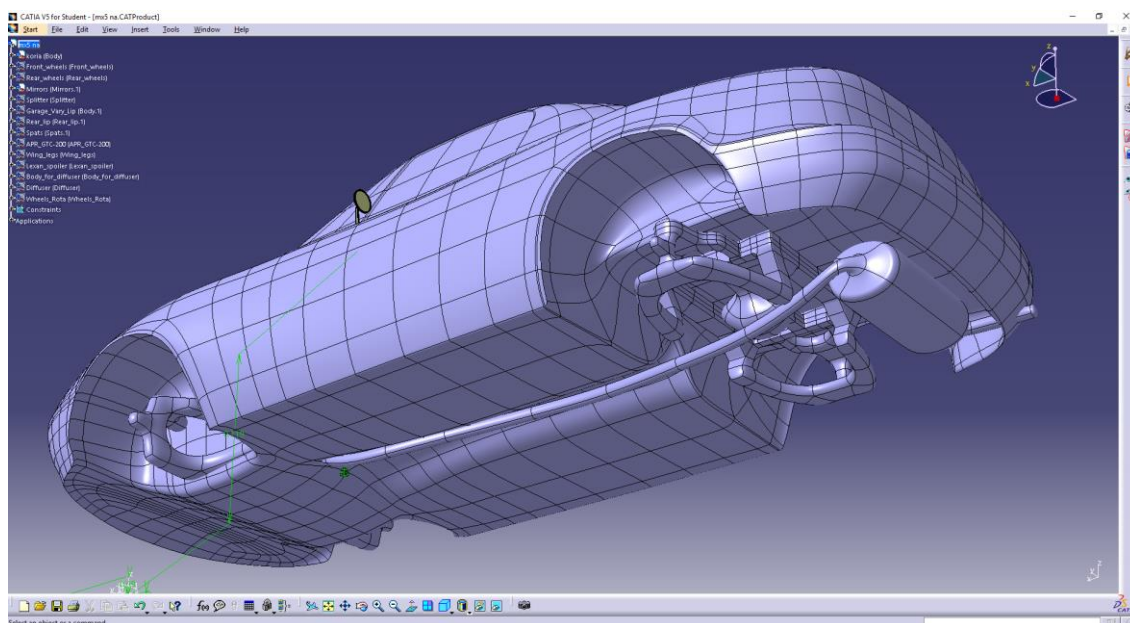
Virtausdynamiikan simulointi edellyttää mahdollisimman tarkkaa 3D-mallia simuloitavasta kappaleesta. Testiautosta oli siis luotava mahdollisimman tarkka malli, sillä tarkoitukseen sopivaa mallia ei ollut ennestään saatavilla. Optimitilanteessa koko auto olisi laserskannattu ja skannauksen avulla luotu tarkka malli. Laserskannaus olisi kuitenkin ollut käytännössä hankalaa, joten auton malli päätettiin luoda käsin mallintamalla. Mallinnus tehtiin Catia Student V5-6R2014 -ohjelmalla käyttäen apuna piirustuksia eri kuvakulmista (kuva 13). Mallin mittakaava on 1:1, eli se on saman kokoinen kuin oikea ajoneuvo. Autosta luotu malli on pintamalli eli vain mallin pinta on mallinnettu ja se on muutoin ontto. Jotta pintamallia voidaan simuloida luotettavasti, on mallin oltava täysin tiivis. Jos mallissa on pienikin reikä, simulaatio laskee virtauksen myös mallin sisäpuolella ja tulokset vääristyvät poikkeuksesta käyttökelvottomiksi.

Mallinnuksessa käytettiin pääasiassa Catian Sketch Tracer, Imagine & Shape ja Generative Shape Design -työkaluja. Catiasta malli tallennettiin simulaatio-ohjelmiston tukemaan .stl-muotoon.



Kuva 13. Auton mallinnus Catiassa.

Virtausdynamiikkaa simuloimassa parhaisiin tuloksiin päästään, kun malli vastaa täysin simuloitavaa kappaletta. Auton mallinnuksessa jouduttiin kuitenkin tekemään joitakin mallin tarkkuuteen liittyviä kompromisseja. Suurin mallintamisessa tehty kompromissi oli ajoneuvon pohja, joka on niin monimutkainen, että sen mallintaminen tarkasti olisi vaatinut kohtuuttoman määrän työtä. Tarkasti mallinnetun pohjan käyttäminen ei simulaatioiden kannalta olisi ollut muutenkaan järkevää, sillä simulaatioiden suorittamiseen vaadittava aika ja laskentateho olisivat kasvaneet huomattavasti tarkasti mallinnetun pohjan myötä. Harrastajat ja amatööri suorittavat ajoneuvoille virtausdynamiikkasimulaatioita usein tasapohjaisilla malleilla. Tasaisella pohjalla suoritettiin simulaatioita, mutta sen todettiin vääristävän tuloksia liikaa. Tasainen pohja luo auton alle alipaineen ja kasvattaa negatiivista nostovoimaa. Se myös helpottaa virtauksen poistumista auton alta ja laskee ilmanvastusta. Eniten tasaisen pohjan käytössä pelättiin kuitenkin sen vääristävän aerodynaamista tasapainoa etu- ja tak akselien välillä. Lopulta päädyttiin mallintamaan pohjan muoto ja tärkeimmät yksityiskohdat, jolloin virtaus ajoneuvon alla käyttäytyisi mahdollisimman realistisesti kuitenkin kasvattamatta simulaatioon kuluva aika kohtuuttomasti (kuva 14).



Kuva 14. Mallin pohja, jossa jouduttiin tekemään kompromisseja.

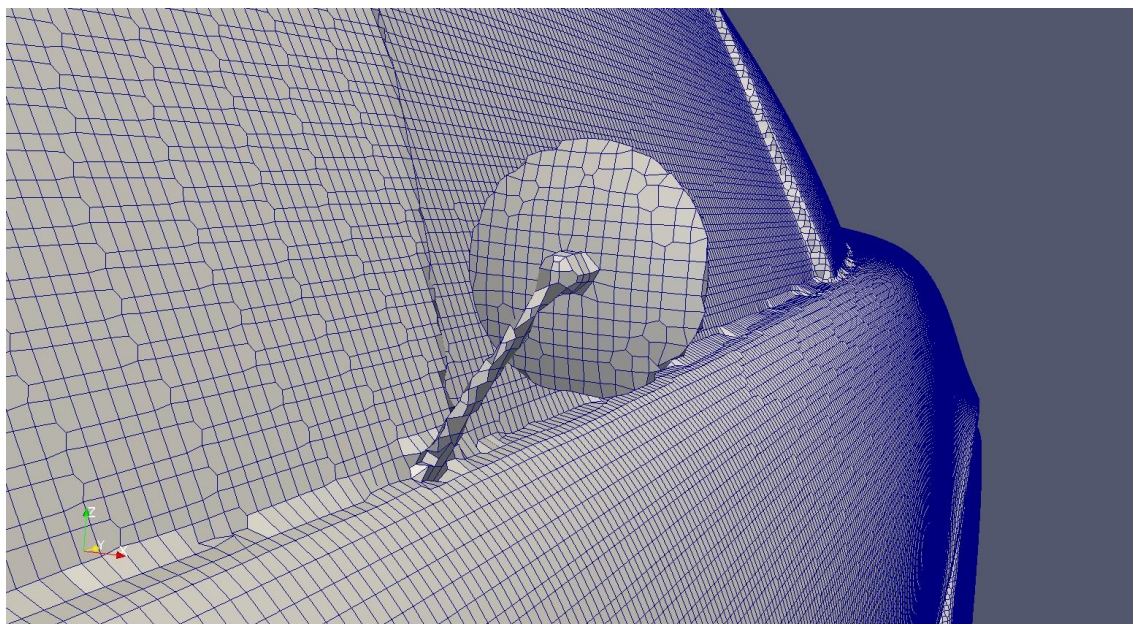
6.2 Numeerinen virtausdynamiikan simulointi

Numeerisella virtausdynamiikalla tarkoitetaan nesteiden ja kaasujen virtauksen tutkimista laskennallisien menetelmin. Tässä opinnäytetyössä tutkittiin ilman virtausta ajoneuvon ympärillä, mutta virtausdynamiikan simuloinnilla on suunnittelussa ja teollisuudessa myös lukemattomia muita käyttötarkoituksia. Virtausdynamiikan simuloinnilla voidaan tutkia esimerkiksi hydraulisia järjestelmiä ja termodynamiikkaa.

Numeerisessa virtausdynamiikan simuloinnissa ohjelma laskee nesteen tai kaasun käyttäytymistä määritetyssä tilanteessa. Prosessin ensimmäisessä vaiheessa simulaatio luo simuloitavaan tilaan ja kappaleen pinnoille verkoston (eng. mesh). Seuraavaksi niin sanottu ratkaisija laskee virtauksen nopeutta, painetta, suuntaa ja tarvittaessa lämpötilaa verkoston leikkauspisteissä. Laskenta suoritetaan monta kertaa, ja kun ennalta määritetty määrä iteraatioita on suoritettu, vertaa ratkaisija iteraatioiden tuloksia keskenään. Laskennan valmistuttua simulaation tuloksia voidaan tarkastella numeerisessa tai visuaalisessa muodossa.

Simulaation tarkkuuden ja paikkaansa pitävyyden kannalta ratkaisevassa osassa on iteraatioiden määrän lisäksi verkoston tarkkuus. Mitä tiheämpi verkosto on, niin sitä enemmän siinä on myös laskettavia leikkauspisteitä. Tarkempi verkosto kasvattaa simulaation suorittamiseen tarvittavaa aikaa ja laskentatehoa huomattavasti, joten on

tärkeää, että verkosto on määritetty tarkoitukseen sopivaksi. [1, s. 74–75, 79–81.] Kuvassa 15 nähdään ajoneuvon mallin pinnalle muodostuva verkosto.



Kuva 15. Simulaation muodostamaa verkostoa ajoneuvon pinnalla.

Numeerisen virtausdynamiikan simulointiin tarvittavat ohjelmat ovat usein ammattilaisille ja yrityksille suunnattuja, ja näin ollen kalliita yksityiselle käyttäjälle. Tarkkoihin ja monimutkaisiin simulaatioihin tarvittava laskentateho vaatii usein myös kalliin supertietokoneen.

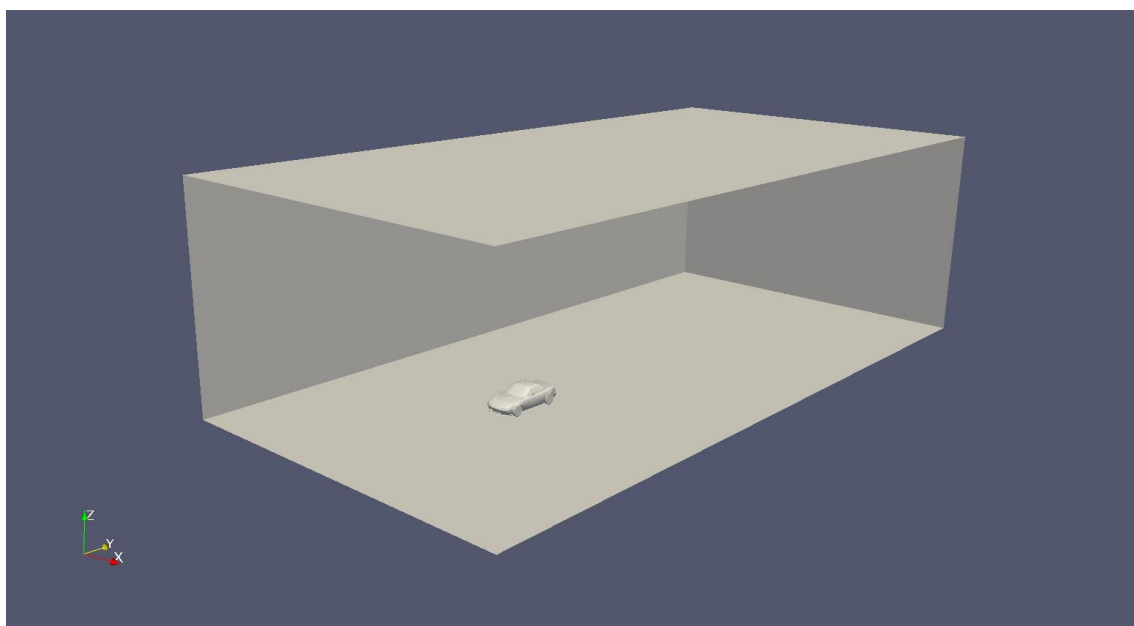
Viime vuosina markkinoille on tullut enemmän yksityisille tahoille suunnattuja kevyempiä virtausdynamiikkaa simuloivia ohjelmistoja. Näillä ohjelmistoilla on mahdollista suorittaa yksinkertaisempia virtausdynamiikan simulaatioita järkevässä ajassa ilman valtavaa laskentatehoa. Näitä ohjelmistoja käytettäessä monimutkaisemman simulaation laskenta voidaan suorittaa etänä supertietokoneella ja näin käyttäjän tietokoneelta ei vaadita niin paljon laskentatehoa. Tämän opinnäytetyön simulaatiot on kuitenkin suoritettu paikallisesti omalla keskusyksiköllä kustannusten minimoimiseksi.

Opinnäytetyössä käytetty OpenFOAM-ohjelmisto on amatööri- ja harrastetasolla kuuluisin. Se on avoimeen lähdekoodiin perustuva numeerisen virtausdynamiikan laskentaohjelma ja se on noussut useiden tahojen suosikiksi. OpenFOAM on alun perin Linux- pohjainen, eikä siinä ole visuaalista käyttöliittymää. Linux-käyttöjärjestelmä ja visuaalisen käyttöliittymän puuttuminen tekevät ohjelman käytöstä hankalaa

aloittelijalle ja oppimiskäyrä ohjelman hallitsemiseksi on erittäin jyrkkä. Pienellä perehtymisellä ja käyttäjien luomia sovelluksia avuksi käyttämällä on yksikertaisten simulaatioiden suorittaminen kuitenkin suhteellisen helppoa.

OpeanFOAMilla suoritettujen simulaatioiden tuloksia voidaan tutkia visuaalisesti Paraview-ohjelmistolla. Paraview'issä voidaan tarkastella esimerkiksi virtausta, virtauksen nopeutta ja kappaleeseen kohdistuvaa painetta. Visuaalinen vertailu simulaatioiden välillä on erittäin hyödyllinen apukeino simulaatioista saatujen numeeristen tulosten erojen ymmärtämiseksi.

Simulaatiot on suoritettu Julien de Charentenayn luomalla sovelluksella, joka suorittaa ennalta määrätyn simulaation OpenFOAMissa. Sovelluksessa on määritelty kuvassa 16 näkyvä simulaatio ajoneuvolle tuulitunnelissa. Simuloitavan tilan seinät, pohja ja katto liikkuvat simulaatioon asetetulla nopeudella. Simulaation laskennassa käytetään yleistä SST k-omega -turbulenssimallia.



Kuva 16. Simulaation virtuaalinen ympäristö visualisoituna.

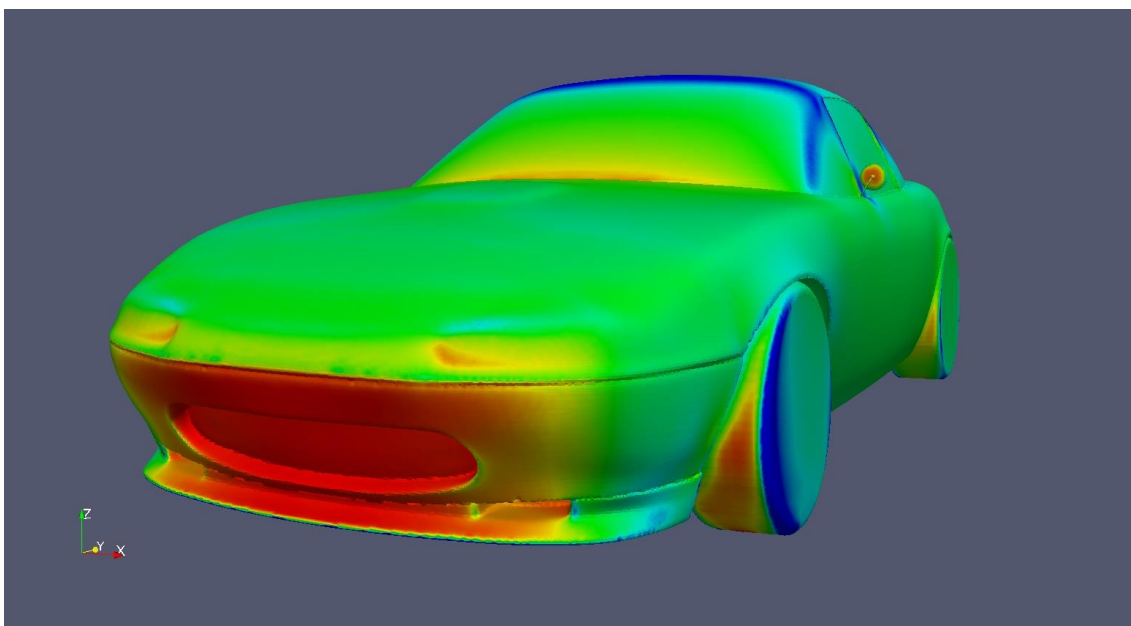
Simulaation verkosto ja muut parametrit on ennalta asetettu sellaisiksi, että simulaation voi suorittaa normaalilla tietokoneella kohtuullisessa ajassa. Hyvän verkoston luominen ja optimointi tyhjästä vaatii paljon perehtymistä ja aikaa, joten Julien de Charentenayn sovellus on suuri apu ajoneuvon virtausdynamiikan simuloinnissa OpenFOAMilla. Simulaatiot on suoritettu nopeudella 160 km/h. Nopeus on valittu simuloitavan auton

suorituskyvyn ja autolla ajettavien ratojen mukaan. Aiemmin radalla kerätystä datasta on todettu, että nopeimmissa mutkissa vauhdit ovat luokkaa 150–170 km/h.

6.3 Simulaation tulokset

Simulaation suorittamisen jälkeen syntyy numeerisia tuloksia malliin vaikuttavista voimista ja .foam tiedosto, jota voidaan tarkastella visuaalisesti Paraview-ohjelmistolla.

Paraview on avoimen lähdekoodin ohjelmisto, joka on tarkoitettu tieteellisen datan visualisointiin ja analysointiin. Tässä opinnäytetyössä simulaation tuloksena syntynyt .foam-tiedosto voidaan avata visuaalisesti tarkasteltavasti Paraview'hun. Ohjelmiston avulla voidaan tarkastella esimerkiksi virtauksen nopeutta, suuntaa ja painetta. Kuvassa 17 nähdään virtauksen luoma paine auton pinnoille. Kuvassa nähtävillä parametreilla punainen tarkoittaa korkeaa painetta ja sininen matalaa painetta.

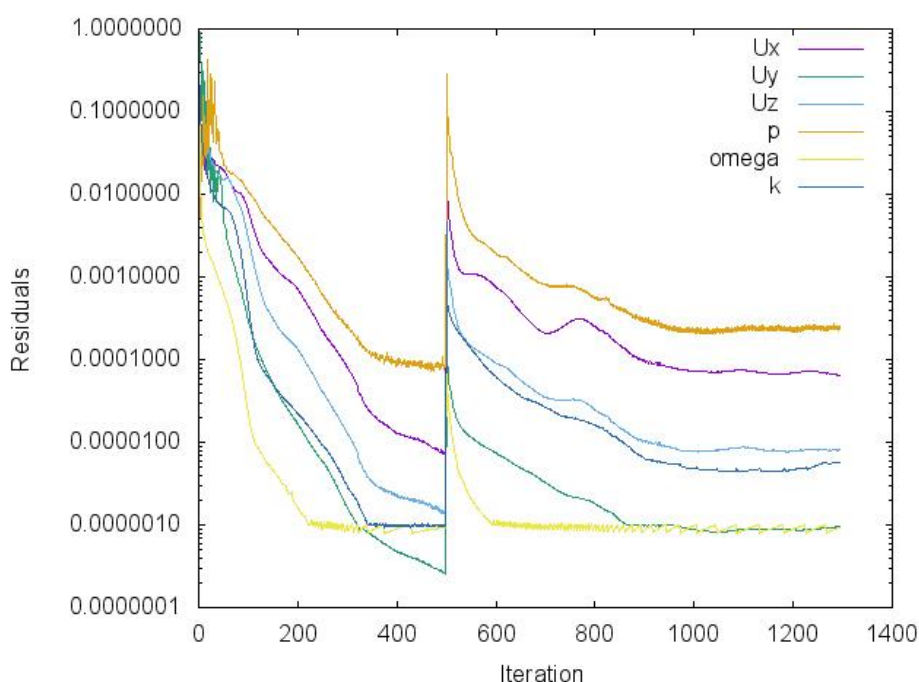


Kuva 17. Virtauksen luoma paine visualisoituna auton mallin pinnoille Paraview'ssa.

Tärkeimmät simulaatiosta saatavat numeeriset arvot ovat malliin vaikuttava ilmanvastus, nostovoima ja paineen keskipiste. Simulaation tuloksista nähdään myös mallin pinta-alat edestä ja ylhäältä katsottuna. Näiden arvojen avulla voidaan laskea simuloidulle mallille ilmanvastus- ja nostovoimakerroin.

Simulaatio muodostaa myös kuvassa 18 nähtävän kuvaajan, josta voidaan arvioida simulaation konvergenssia ja onnistumista. Kuvaajan x-akselilla on esitetty simulaation laskennan iteraatiot, joita on onnistuneessa simulaatiossa yhteensä 1300. Kuvaajan y-akselilla on esitetty jäännösarvo, jonka avulla voidaan arvioida simulaation tarkkuutta ja konvergenssia. Mitä pienemmät jäännösarvot simulaatiosta saadaan, niin sitä tarkempia tulokset ovat. Jos jäännösarvot nousevat tai laskevat koko simulaation ajan, niin simulaation tulokset eivät ole vakaantuneet ja simulaatio ei ole täysin onnistunut.

Convergence Assessment



Kuva 18. Simulaation luoma konvergenssiarviointi.

Kuvaajasta nähdään myös simulaation eteneminen. Ensimmäiset 500 iteraatiota suoritetaan väljemmällä verkostolla, jonka jälkeen verkostoa tarkennetaan ja suoritetaan loput 800 iteraatiota. Jäännösarvosta nähdään, kuinka paljon simulaation konvergenssi paranee toisen vaiheen loppua kohti.

7 Suunnittelu

7.1 Vakiomalli

Suunnittelua ei jatkettu vuonna 2016 tehtyjen muutosten päälle, vaan aerodynamiikan suunnittelu aloitettiin simuloimalla mallia, joka vastaa autoa vakiona. Simulaation tuloksista määritettiin vakioauton aerodynaamisia ominaisuuksia ja pyrittiin löytämään osa-alueita, joita kannattaa lähteä parantamaan. Tuloksista etsittiin myös mahdollisia ongelmakohtia, joita auton aerodynamiikassa on alun perin.

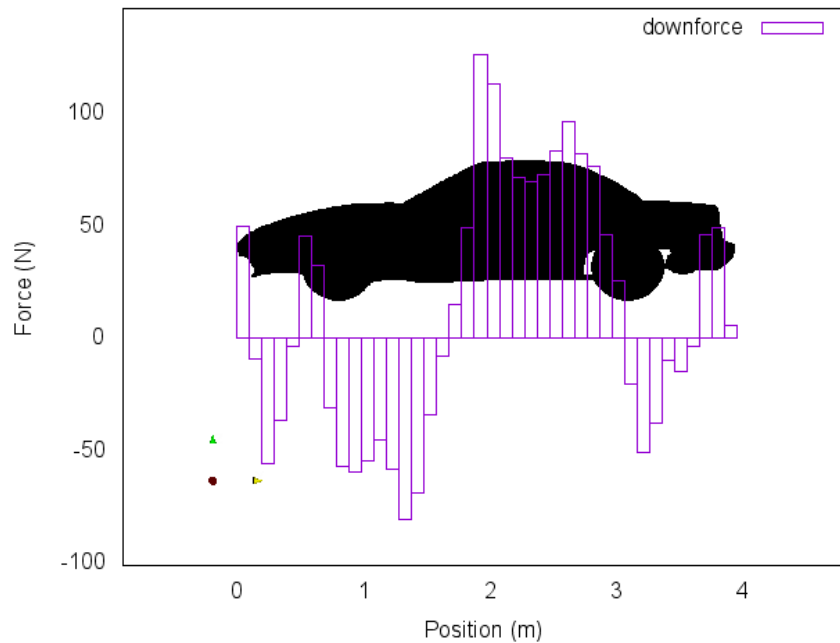
Vakiomallilla suoritetun simulaation oleelliset numeeriset tulokset nähdään taulukosta 1. Malli tuottaa nopeudessa 160 km/h melkein 500 N positiivista nostovoimaa ja saatu ilmanvastuskerroin 0,46 on korkea verrattuna nykyaikaisiin autoihin, joiden suunnittelussa on huomioitu aerodynamiikka huomattavasti enemmän. Auton pieni otsapinta-ala kuitenkin pitää vastuksen melko pienenä korkeasta ilmanvastuskertoimesta huolimatta.

Taulukko 1. Vakioauton simulaation numeeriset tulokset.

Vastus (N)	Noste (N)	Cd	Cl	CoP (m)	L/D
897,86	496,44	0,46	0,25	3,511	0,54

Vakioautojen käyttäjien kokemukset viittaavat siihen, että kyseinen auto tuottaa nostovoimaa nopeuksissa yli 120 km/h. Käyttäjät ovat kertoneet huomanneensa näissä nopeuksissa kevenemisen tunnetta esimerkiksi ohjauksessa.

Simulaation nostovoimajakaumaa (kuva 19) tarkastelemalla havaittiin, että suurin osa nostovoimasta muodostuu auton katon kohdalla. ParaView:ssa virtausta visuaalisesti tarkastelemalla nähtiin, että auton kattolinja toimii siiven tavoin. Auton yli kulkevan virtauksen nopeus kasvaa katon kohdalla ja katon päälle syntyy matalampaa painetta ja tätä kautta nostovoimaa.



Kuva 19. Vakioauton nostovoimajakauma.

Huomio kiinnittyi myös takaluukun takareunan melko pyöreään muotoon, josta virtaus lähtee taittumaan alaspäin. Coandă-ilmiön mukaisesti virtaus irtoaa huonommin pyöreästä kuin terävästä pinnasta. Virtauksen huono irtoaminen ja alaspäin kääntyminen takaluukun reunasta aiheuttaa nostovoimaa ja kasvattaa ilmanvastusta. Alaspäin suuntautunut virtaus häiritsee auton alta tulevaa virtausta ja luo lisää ilmanvastusta, kun virtaus ei pääse poistumaan auton alta vapaasti. Virtauksen nopeuden kasvu takaluukun reunalla aiheuttaa myös matalan paineen takaluukun takareunaan ja luo nostovoimaa. Tämä nähdään myös kuvassa 19.

Auton etuosassa selkeitä ongelmakohtia ovat etupuskurin alaosan muoto ja edestä katsottuna esillä olevat eturenkaat. Etupuskurin alaosa ohjaa ilmaa auton alle ja syntyy nostovoimaa sekä ilmanvastusta. Pohjan epätasaisuus luo turbulenttista virtausta ja pyörteilyä. Auton alle syntyy korkeampi paine ja sitä kautta nostovoimaa, kun turbulenttinen ja pyörteilevä virtaus ei pääse poistumaan auton alta tehokkaasti. Esillä olevat eturenkaat luovat ilmanvastusta virtauksen osuessa renkaan tasaiseen kulutuspinnaan ja ohjaavat virtausta auton alle. Renkaat aiheuttavat myös pyöriessään pyörteitä ja häiritsevät renkaiden läheltä kulkevaa virtausta.

7.2 Ajokorkeus ja renkaat

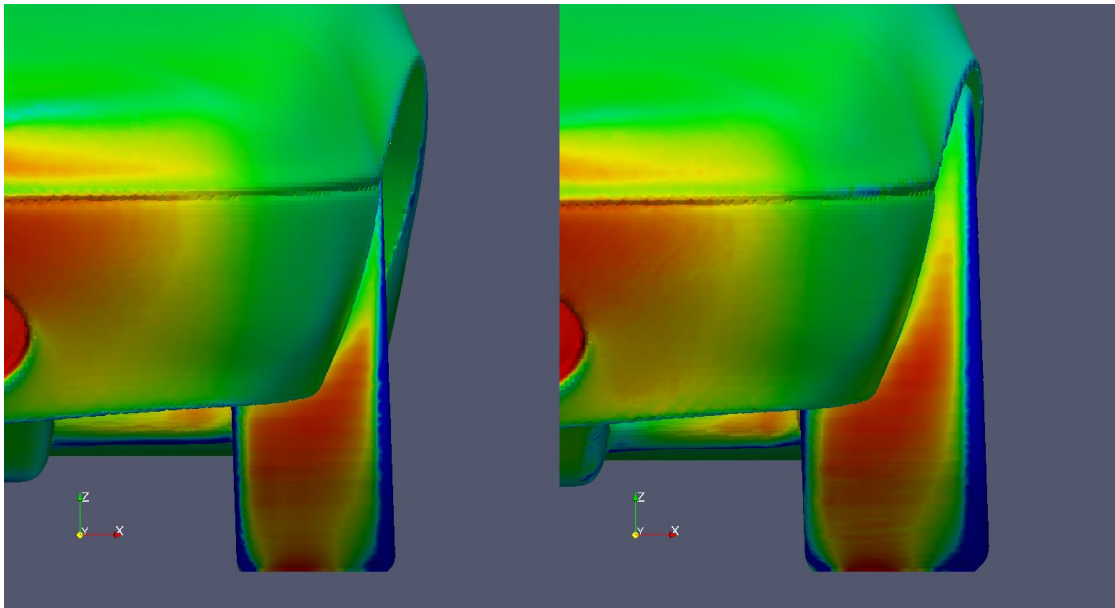
Ensimmäiset vakiomalliin tehdyt muutokset olivat ajokorkeuden ja rengaskoon muuttaminen tutkittavan auton mukaisiksi. Mallia simuloitiin 50 mm madallettuna vakiokokoisilla 175 mm leveillä renkailla ja autossa käytettävillä 205 mm leveillä renkailla. Ensimmäisten simulaatioiden tulokset nähdään taulukossa 2.

Taulukko 2. Simulaatioiden tulokset ajokorkeuden ja renkaiden muutosten osalta.

Malli	Vastus (N)	Noste (N)	Cd	Cl	CoP (m)	L/D
stock	897,86	496,44	0,46	0,25	3,511	0,55
stock_lowered	869,34	493,40	0,45	0,25	3,453	0,57
stock_lowered_wheels	908,71	617,35	0,46	0,31	3,085	0,68

Simulaatioiden tuloksista nähtiin, että matalampi ajokorkeus laskee ilmanvastusta, mutta muut arvot pysyvät lähes samoina vakiokorkeuteen verrattuna. Ilmanvastuksen laskemiseen vaikuttavat keulan pienempi otsapinta-ala, joka johtuu renkaiden jäämisestä puskurin taakse, ja mallin epätasaisen pohjan ali kulkevan virtauksen rajoittuminen.

Rengaskoon muuttaminen aiheutti suurempia eroja. Kuvassa 20 nähdään kuinka 30mm alkuperäistä leveämmät renkaat kasvattavat mallin otsapinta-alaa ja tulevat enemmän esiin korin ja varsinkin etupuskurin takaa kasvattaen vastusta 4,5 prosentilla. Moderneissa autoissa renkaiden aiheuttama vastus on usein otettu huomioon puskurin suunnittelussa ja virtaus ohjataan kokonaan eturpyörien ohi. Leveämpien renkaiden seurauksena mallin nostovoima kasvoi 124 N. Lisääntynyt renkaan kulutuspintaan osuva virtaus ohjautuu alaspäin aiheuttaen nostovoimaa. Virtauksen ohjaaminen renkaan ohi on siis erittäin tärkeää niin nostovoiman kuin vastuksen kannalta.



Kuva 20. Leveämpi ulkonevampi pyörä luo enemmän ilmanvastusta.

7.3 Etulippa ja spoileri

Seuraavaksi tutkittiin etulipan ja spoilerin vaikutusta. Autossa on ollut jo ennen tätä työtä asennettuna lippa edessä etupuskurin alla ja spoileri takaluukun päällä, kuten kuvassa 21 näkyy.



Kuva 21. Tutkitun auton spoileri.

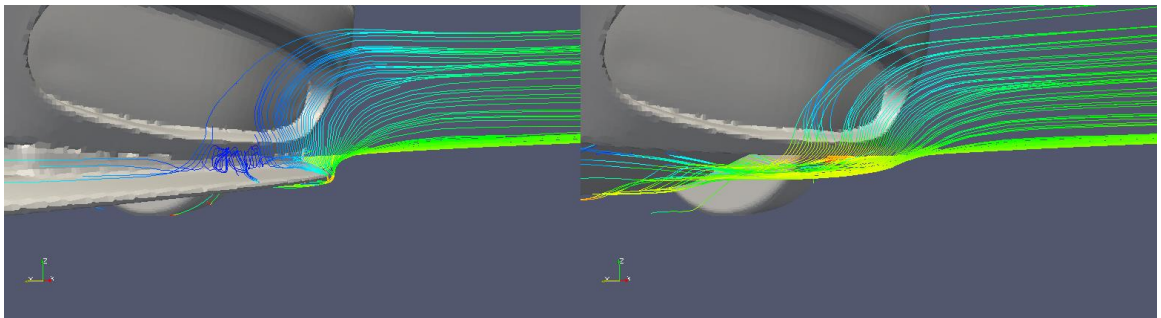
Simulaatiot suoritettiin yksittäisillä osilla ja molemmilla yhtä aikaa. Simulaatioiden tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Etulipan ja spoilerin simulaatioiden tulokset.

Malli	Vastus (N)	Noste (N)	Cd	Cl	CoP (m)	L/D
stock_lowered_wheels	908,71	617,35	0,51	0,31	3,085	0,68
front_lip	893,47	408,74	0,45	0,20	4,731	0,46
rear_lip	891,62	261,73	0,45	0,22	2,108	0,29
both_lips	881,63	62,92	0,44	0,03	13,145	0,07

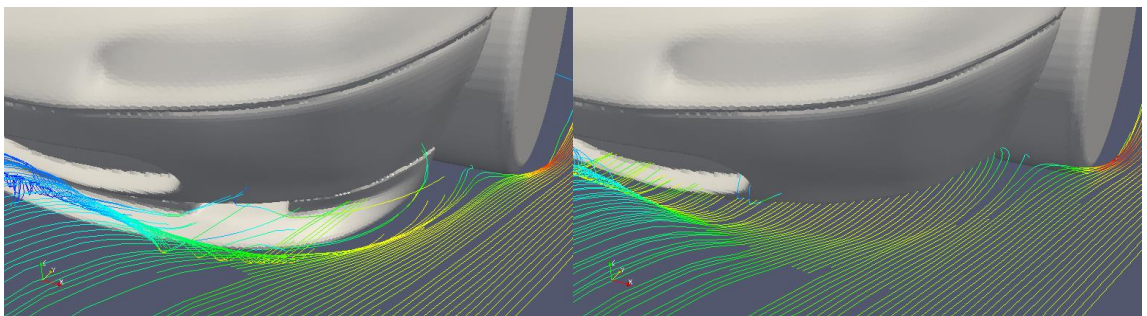
Tuloksissa havaittiin kaikissa arvoissa muutosta parempaan suuntaan. Varsinkin nostovoima laski osien myötä merkittävästi ja molemmat osat asennettuna malli tuotti nostovoimaa vain 10 % siitä, mitä ilman osia. Ilmanvastus pieneni osien myötä vain vähän. Nostovoiman vähennyttyä huomattavasti oli positiivista, että vastus ei kasvanut lainkaan.

Kuvassa 22 oikealla nähdään, että alkuperäisen etupuskurin alaosa on muodoltaan melko pyöreä ja ohjaa puskurin alaosaan osuvaa virtausta auton alle.



Kuva 22. Vasemmalla virtaus auton alle etulippa asennettuna ja oikealla ilman etulippaa.

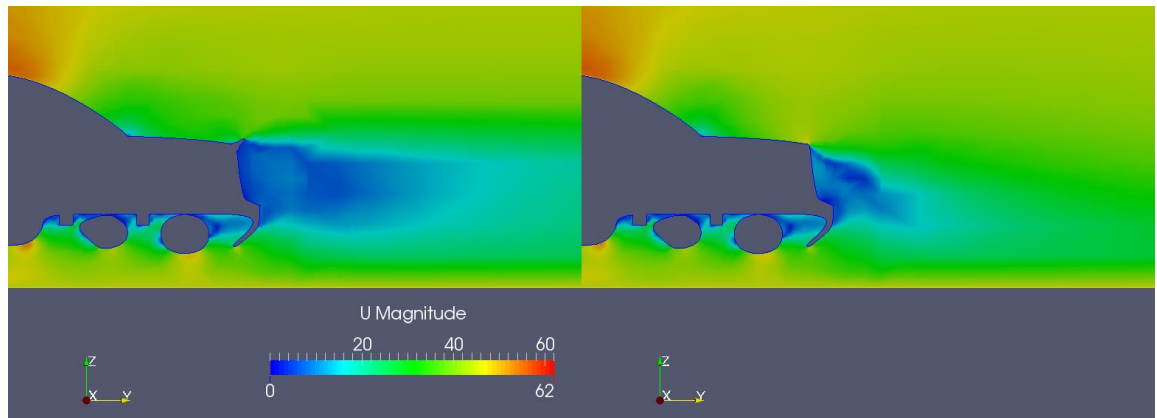
Etulippa pienentää rakoa maan ja auton välillä rajoittaen auton alle pääsevää virtausta. Kuvasta 23 on nähdään, kuinka etulippa luo puskurin alalaitaan pyörteen, joka ohjaa puskuriin ylemmäksi osuvaa virtausta auton sivuille eikä sen alle.



Kuva 23. Vasemmalla virtaus etulippa asennettuna ja oikealla ilman etulippaa.

Etulipan myötä mallin otsapinta-ala kasvaa ja etupuskurin alalaitaan ja etulipan kohdalle syntyy vastusta kasvattavaa pyörteilevää virtausta. Etulipan kanssa mallin alle ei kuitenkaan pääse niin paljon virtausta kuin ilman lippaa, ja se kompensoi ilmanvastusta niin paljon, että kokonaisuudessaan ilmanvastus pienenee.

Ilman spoileria takaluukun päältä alas taittuva virtaus häiritsee mallin alta poistuvaa virtausta, jolloin syntyy nostovoimaa ja ilmanvastusta. Spoileri ohjaa virtauksen takaluukusta ylöspäin, mikä auttaa virtausta poistumaan auton alta helpommin. Spoileri mitätöi Coandă-ilmiön aiheuttaman matalamman paineen takaluukun takalaidasta, ja ylöspäin ohjautuva virtaus saa takaluukun päälle aikaan korkeamman paineen alueen. Nostovoima pienenee, mutta samalla spoileri luo ilmanvastusta virtauksen kääntyessä jyrkästi ylöspäin. Kokonaisuutena spoileri vähentää niin nostovoimaa kuin ilmanvastusta.



Kuva 24. Virtaus auton takaosassa. Vasemmalla spoileri asennettuna ja oikealla ilman.

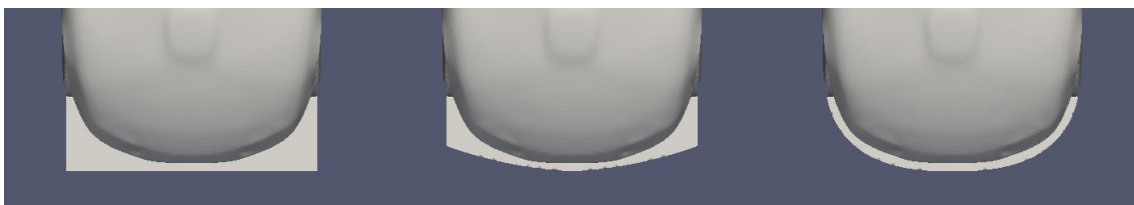
Etulipan ja spoilerin yhteisvaikutus on huomattava ja molemmat osat asennettuna malli tuottaa enää vain hyvin vähän nostovoimaa. Osat korjaavat tehokkaasti vakioauton aerodynaamisia ongelmakohtia. Niillä saavutettiin suuri hyöty nostovoimassa ilman ilmanvastuksen kasvamista. Tulosten ja havaintojen perusteella osat päätettiin säilyttää autossa ja aerodynamiikan suunnittelua jatkettiin niiden ympärille.

7.4 Splitteri

7.4.1 Muoto

Seuraavaksi siirryttiin suunnittelemaan splitteri, joka toimisi auton etuosan pääasiallisena negatiivisen nostovoiman tuottajana. Suunnittelu aloitettiin etsimällä sopiva profiili splitterille. Eri profiileilla suoritetuissa simulaatioissa käytettiin 10 mm paksua ja 100 mm korkeudella olevaa splitteriä. Simulaatioita suoritettiin yhdeksällä eri profiililla. Timeattack sääntöjen mukaan splitteri ei saa sivuilla ylittää korilinjaa ja edessä se saa yltää korkeintaan 50 mm ulommas etupuskurista. Muotoa muutettiin vain etupuskurin ulkopuolella ja auton alla muoto pidettiin samana. Splitteri päättyy etuakselin linjalle, kuten Time Attack -säännöissä määrätään.

Simulaatioiden perusteella muodolla ei ollut suurta vaikutusta ilmanvastukseen ja ilmanvastuksessa nähtiin vain parin kymmenen newtonin heittoja. Splitterin pinta-alan kasvattaminen vaikuttaa kuitenkin positiivisesti negatiiviseen nostovoimaan. Suorakulmion muotoinen splitteri, joka seurasi sivuilla korilinjaa ja ylsi etupuskurin linjan yli 50 mm, tuotti ylivoimaisesti suurimman negatiivisen nostovoiman (155 N). Pienimmän negatiivisen nostovoiman (19 N), tuotti pinta-alaltaan pienin puskurin linjaa seuraava muoto. Muut testatut muodot olivat keskenään muutaman kymmenen newtonin sisällä, joten valittiin etupuskurin linjaa noin 50 mm:n etäisyydellä seuraava muoto, joka tuotti negatiivista nostovoimaa 69 N. Muoto oli testatuista muodoista järkevin kompromissi negatiivisen nostovoiman ja liikennekäyttöön soveltuvuuden kannalta. Raja-arvoja seuraavaa suorakulmaista muotoa lukuun ottamatta erilaisella muodolla olisi voitu saavuttaa vain muutaman kymmenen newtonin etu. Tällöinkin splitteri olisi kuitenkin yltänyt sivuilta paljon pidemmälle aiheuttaen ongelmia liikenteessä.



Kuva 25. Esimerkkejä erilaisista testatuista splitterin muodoista.

7.4.2 Korkeus ja kulma

Muodon määrittämisen jälkeen simuloitiin splitteriä eri korkeudella ja eri kulmissa laskemalla splitterin etureunaa. Simulaatiot suoritettiin splitteri 100 mm:n, 80 mm:n ja 60 mm:n korkeudella maan pinnasta, sekä nollan, yhden ja kahden asteen kulmissa, niin että splitterin takalaita oli 100mm korkeudella. Suurempia kulmia ei simuloitu, sillä suuremmalla kulmalla splitterin etureuna olisi niin lähellä maan pintaa, että se osuisi maahan jarrutuksissa. Simulaatioiden tulokset on esitetty taulukossa 4.

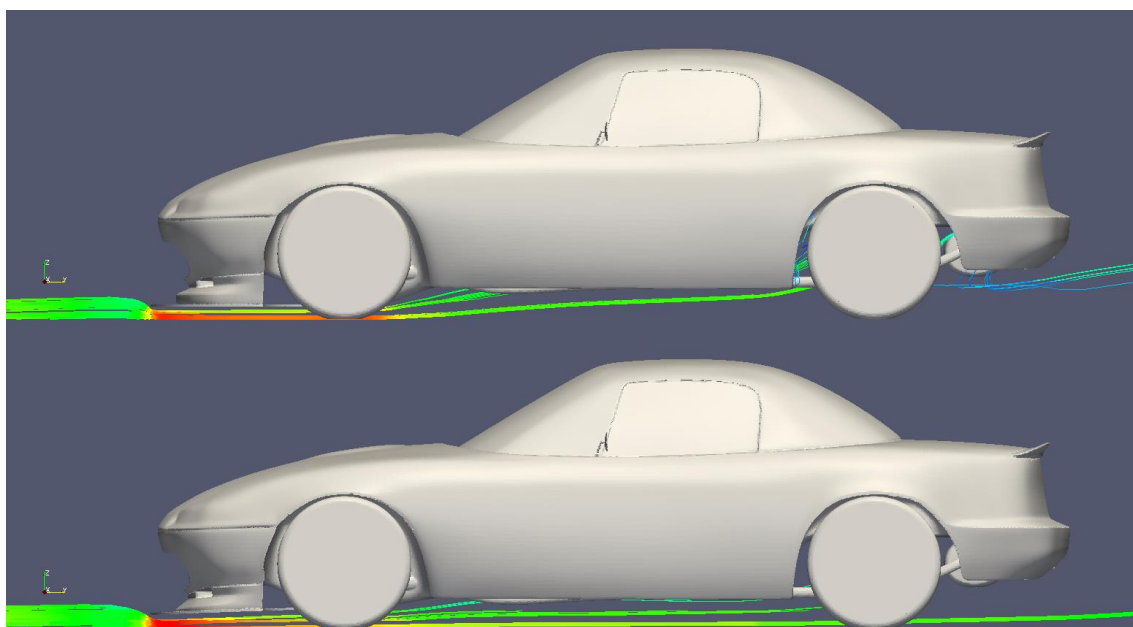
Taulukko 4. Splitterin kulman ja korkeuden simulaatioiden tulokset.

Malli	Vastus (N)	Noste (N)	Cd	Cl	CoP (m)	L/D
both_lips	881,63	62,92	0,44	0,03	13,145	0,07
height_100mm	888,30	-68,62	0,44	-0,03	-13,794	-0,08
height_60mm	862,36	-105,93	0,42	-0,05	-10,043	-0,12
angle_2_degrees	853,52	-230,96	0,42	-0,11	-3,894	-0,27

Laskemalla splitteri 60 mm:n korkeudelle maasta saavutettiin noin 5 % pienempi ilmanvastus ja 40 N suurempi negatiivinen nostovoima verrattuna splitteriin 100 mm:n korkeudella. Lähempänä maata oleva splitteri kasvattaa mallin otsapinta-alaa, mutta estää samalla virtausta pääsemästä mallin alle parantaen kokonaisuudessaan niin negatiivista nostovoimaa kuin vastusta. 60 mm:n korkeudella maasta oleva splitteri hankaloittaisi kuitenkin auton käyttöä liikenteessä liikaa ja tekisi splitterin takaosan liittämisen auton pohjaan mahdollisimman saumattomasti vaikeaa.

Koko splitterin laskemisen jälkeen testattiin splitteriä erilaisissa kulmissa. Kulman säätö olisi helppo toteuttaa sellaiseksi, että splitterin etureuna voidaan laskea radalla lähemmäksi maata ja nostaa takaisin korkeammalle radalta poistuttaessa. Splitterin kulmaan asettaminen todettiin tehokkaaksi, sillä kahden asteen kulmassa koko malli tuotti yli kaksi kertaa enemmän negatiivista nostovoimaa, kuin splitteri 60 mm:n korkeudella. Kulmassa olevan splitterin alta kulkevan virtauksen nopeus kasvaa splitterin etuosassa suuremmaksi verrattuna vaakatasossa olevaan splitteriin. Vaakatasossa olevan splitterin takaosassa syntyy turbulenttista virtausta ja häviöitä. Kulmassa olevan splitterin alta kulkeva virtaus pysyy laminaarisempina ja venturi-ilmiö toteutuu paremmin kuin vaakatasossa olevan splitterin kanssa. Siirtymä splitterin takaosasta ajoneuvon pohjaan on sulavampi ja virtauksen kannalta parempi, kun splitteri on kulmassa. Ilmiön toteutumista todellisuudessa on kuitenkin vaikea arvioida, sillä mallin pohja ei vastaa ajoneuvon todellista pohjaa täydellisesti.

Vaikka kulmassa oleva splitteri tuottaa kaksi kertaa enemmän negatiivista nostovoimaa edempänä kuin vaakatasossa oleva splitteri, niin kulmassa olevalla splitterillä ajoneuvon paineen keskipiste on paljon taempana kuin vaakatasossa olevalla splitterillä. Paraview:llä virtausta tutkimalla selvisi, että vaakatasossa oleva splitteri tuottaa enemmän nostovoimaa auton takaosaan, mikä selittää paineen keskipisteen siirtymisen. 60 mm:n korkeudella vaakatasossa olevan splitterin kanssa virtaus irtaamaa pinnasta splitterin jälkeen. Virtaus imeytyy epätasaiseen pohjaan enemmän kuin kulmassa olevan splitterin kanssa ja osa virtauksesta jää pussiin takapuskurin taakse (kuva 26). Paineen keskipiste on siis kulmassa olevalla splitterillä paljon taempana siksi, että nostovoima auton takaosassa pienenee verrattuna vaakatasossa olevaan splitteriin.



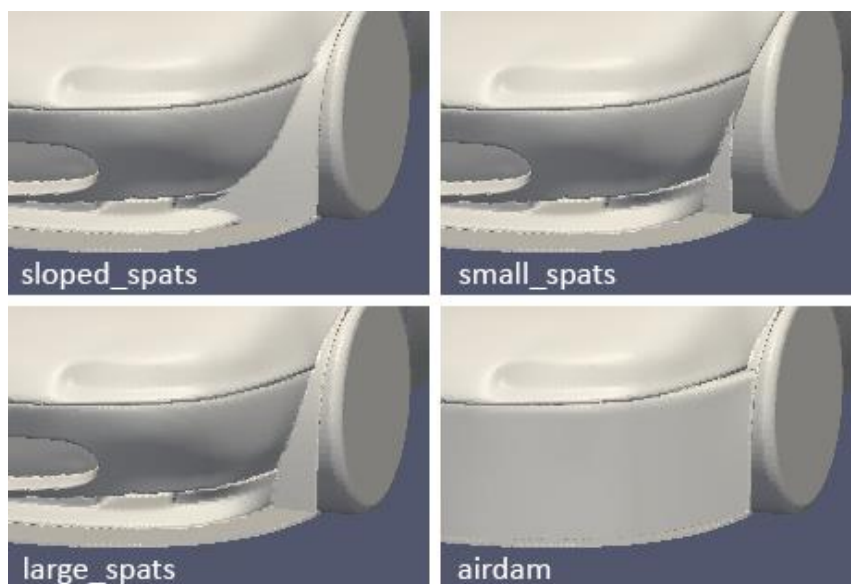
Kuva 26. Virtaus auton alla. Ylempänä splitteri vaakatasossa 60 mm:n korkeudella ja alla 2 asteen kulmassa splitterin takaosa 100 mm:n korkeudella.

On epätodennäköistä, että virtaus käyttäytyy tässä tapauksessa todellisuudessa samalla tavalla kuin simulaatioissa. Kompromissit pohjan mallinnuksessa näkyvät selkeästi splitterin kulman ja korkeuden simulaatioissa. Splitterin kulman muuttaminen tuskin todellisuudessa vaikuttaa yhtä paljon auton takapään tuottamaan nostovoimaan, sillä pohjan luoma turbulenttinen virtaus pienentää splitterin kulman vaikutusta takapään virtaukseen.

7.5 Etupyörien ilmanohjaimet

Splitterin suunnittelun jälkeen mietittiin virtauksen ohjausta etupyörien ohi. Jo vakiomallilla tehdyissä simulaatioissa huomattiin, että eturenkaat tuottavat tarpeetonta ilmanvastusta ja nostovoimaa tulemalla liikaa esiin etupuskurin takaa. Ongelman ratkaisemiseksi testattiin muutamaa erilaista ratkaisua jatkaa puskuria peittämään etupyörät paremmin.

Etupyörien edessä testattiin erikokoisia suoria ja kulmassa olevia ilmanohjaimia, jotka jatkuvat splitteristä etulokasuojaan. Simulaatioita tehtiin myös koko puskurin kokoisella ilmapadolla, jolla peitettiin koko puskurin alalaita. Tällainen ilmapato on hyvin yleinen tapa parantaa testatun automallin keulan aerodynamiikkaa kilpa-autoksi muutettaessa. Kuvassa 27 esitettyjen ilmanohjainten simulaatiot suoritettiin splitteri vaakatasossa 100 mm:n korkeudella.



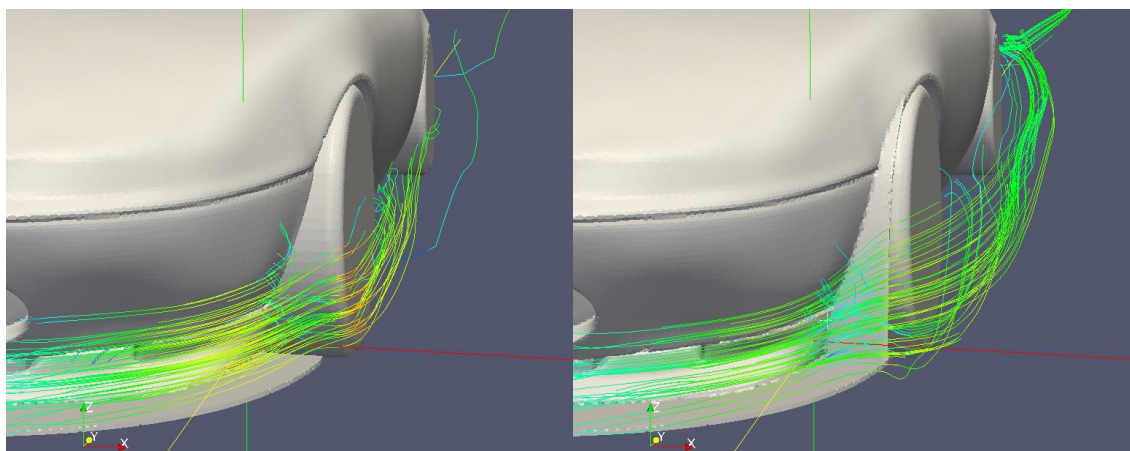
Kuva 27. Simuloidut etupyörien ilmanohjaimet.

Taulukossa 5 ilmoitetut tulokset olivat yllättäviä, sillä oletettiin, että ilmanvastuksessa nähtäisiin paljon suurempia eroja eri ratkaisujen välillä. Eniten ja vähiten ilmanvastusta tuottaneiden mallien välillä oli kuitenkin vain noin 3 prosentin ero. Nostovoimassa nähdyt erot olivat päinvastoin paljon suurempia kuin etukäteen odotettiin.

Taulukko 5. Tulokset etupyörien ilmanohjainten simulaatioista.

Malli	Vastus (N)	Noste (N)	Cd	Cl	CoP (m)	L/D
height_100mm	888,30	-68,62	0,44	-0,03	13,794	-0,08
sloped_spats	891,41	-383,99	0,45	-0,19	-2,050	-0,43
small_spats	879,35	-214,42	0,44	-0,11	-3,919	-0,24
large_spats	916,64	-424,81	0,46	-0,21	-1,723	-0,46
airdam	875,72	-266,44	0,44	-0,13	-3,261	-0,30

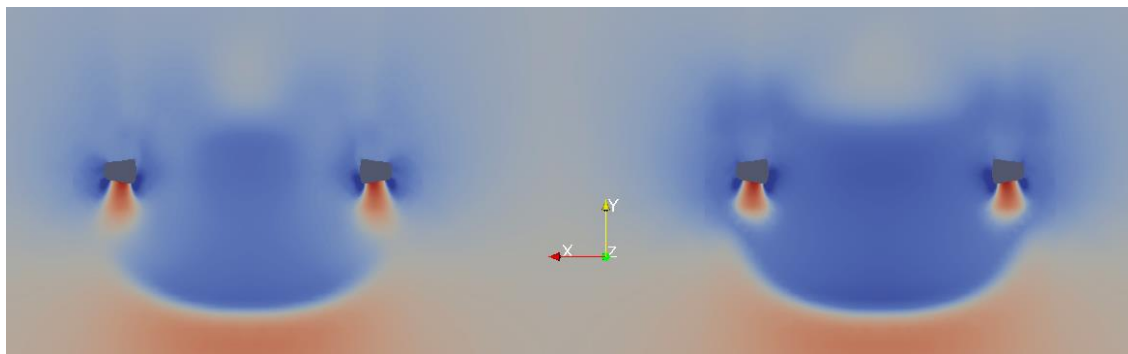
Visuaalinen tutkinta Paraview'ssa auttoi ymmärtämään nostovoimassa havaitut suuret erot. Ilmanohjaimet estävät virtauksen pääsyn mallin alle renkaan ja splitterin välistä (kuva 28). Tämä tehostaa splitterin toimintaa huomattavasti, kun mallin alle päätyvä virtaus ei pääse häiritsemään splitterin alle syntyvää matalaa painetta. Renkaan edestä mallin alle ohjautuvan virtauksen väheneminen vahvistaa huomattavasti splitterin alla tapahtuvaa venturi-ilmiötä, mikä näkyy suurempana negatiivisena nostovoimana. Kuvassa 28 on visualisoitu virtausta etupyörän ohi ilman ilmanohjainta ja leveää suora ilmanohjain (large_spats) asennettuna. Kuvassa nähdään myös, miten ilmanohjain ohjaa virtausta ohi ilmanvastusta luovasta takapyörästä.



Kuva 28. Vasemmalla virtaus etupyörän ohi ilman ilmanohjainta ja oikealla leveällä suoralla ilmanohjaimella.

Suurin negatiivinen nostovoima saavutettiin mahdollisimman leveillä suorilla ilmanohjaimilla. Verrattuna yhtä leveisiin kulmassa oleviin ilmanohjaimiin suorat ilmanohjaimet tuottivat 40 N enemmän negatiivista nostovoimaa ja 25 N enemmän vastusta. Suorilla ilmanohjaimilla saadaan hyödynnettyä enemmän pinta-alaa splitterin päältä ja saavutetaan suurempi negatiivinen nostovoima. Kuvassa 29 on visualisoitu auton etuosan luomaa painetta tien pintaan. Kuvassa punainen väri kuvaa korkeampaa

ja sininen matalampaa painetta. Nähdään, että ilmanohjaimet asennettuna ajoneuvon etuosa tuottaa selvästi matalamman paineen tien pinnan ja splitterin välille.



Kuva 29. Auton etuosan tien pintaan luoma paine. Vasemmalla tilanne ilman ilmanohjaimia ja oikealla leveät suorat ilmanohjaimet (large_spats) asennettuna.

Koko puskurin levyinen ilmapato tuotti simuloidusta ratkaisusta vähintään ilmanvastusta. Negatiivinen nostovoima ei kuitenkaan ilmapadolla ollut yhtä suuri kuin leveillä ilmanohjaimilla. Ilmapato peittää suuren osan splitterin pinta-alasta, mikä aiheuttaa negatiivisen nostovoiman pienenemisen. Jos splitterin kokoa voitaisiin kasvattaa, niin ilmapadolla olisi mahdollista saada aikaan hyvä nostovoiman ja ilmanvastuksen suhde. Tämän opinnäytetyön rajauksen takia ilmapato ei kuitenkaan ollut järkevin ratkaisu.

Käytettäväksi ratkaisuksi valittiin leveät suorat ilmanohjaimet, koska suorien ilmanohjainten nostovoiman ja ilmanvastuksen suhde oli hieman parempi kuin kulmassa olevilla ilmanohjaimilla. Suorat ilmanohjaimet olivat myös paljon helpommat ja yksinkertaisemmat valmistaa. Ilmanohjainten simulaatioista saadut tulokset olivat erittäin hyviä. Negatiivista nostovoimaa saatiin kasvatettua yli 350 N:n ilmanvastuksen kasvaessa vain 30 N.

7.6 Takasiipi

Suunnittelun alkuvaiheesta asti oli selvää, että etupään negatiivista nostovoimaa tasapainottamaan tarvittaisiin auton takapäähän siipi. Siipi haluttiin asentaa kattolinjan alapuolelle, joten valittiin suhteellisen pieni 3D-profiilinen siipi. Siiven ei haluttu herättävän liikaa huomiota liikenteessä ja timeattack sääntöjen mukaan siipi ei saa ylittää korilinjaa sivuilta eikä takaa. Siiveksi valittiin amerikkalaisen APR:n pienin valmistama 1540 mm leveä GTC-200 siipi. Valintaan päädyttiin siiven edullisen hinnan,

valmistajan tarjoaman CFD-datan ja muiden käyttäjien positiivisten kokemusten perusteella.



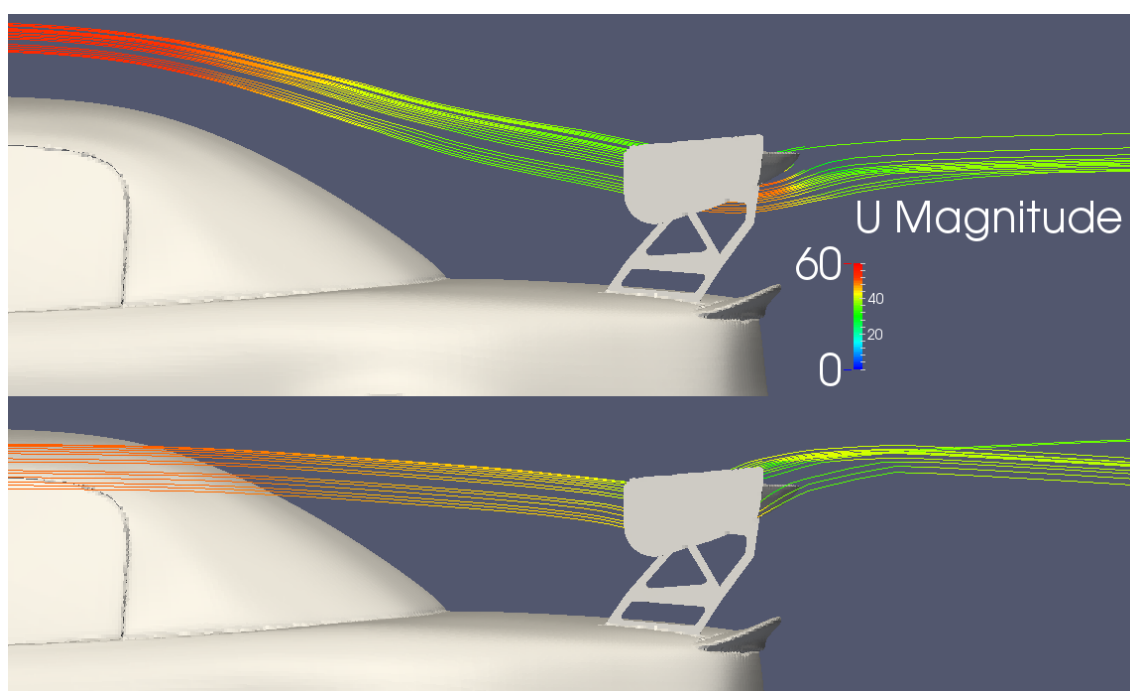
Kuva 30. APR GTC-200 -takasiipi mallinnettuna.

Takasiipi mallinnettiin piirustusten ja itse otettujen kuvien perusteella. Siiven mallinnuksen jälkeen siipeä simuloitiin eri kulmissa ja saatuja tuloksia verrattiin valmistajan ilmoittamiin arvoihin. Nostovoimassa havaittiin vain noin 5 prosentin eroja valmistajan ilmoittamiin arvoihin, mutta valmistajan ilmoittama ilmanvastus oli kaikilla kulmilla vain noin puolet siitä, mitä simulaatioiden tulokset osoittivat. Ilman tarkempia tietoja valmistajan suorittamista simulaatioista on mahdotonta arvioida niiden paikkaansa pitävyyttä, mutta ilmoitettu jopa 10-kertainen negatiivinen nostovoima vastukseen verrattuna vaikuttaa erittäin suurelta. [13]

Tässä vaiheessa kokeiltiin myös, kuinka paljon siiven jalat vaikuttavat nostovoimaan ja ilmanvastukseen. Jalkojen kanssa simuloituna siiven vastus pysyi melkein samana, mutta negatiivinen nostovoima laski 10 asteen kulmassa melkein 100 N verrattuna simulaatioon ilman jalkoja. Jalat häiritsevät virtausta siiven alapuolella, missä suurin osa negatiivisesta nostovoimasta syntyy. Tästä syystä varsinkin GT-luokan kilpa-autoissa on viime vuosina siirrytty jalkoihin, jotka kiinnittyvät siipeen yläpuolelta. Tällöin tärkeämpi virtaus siiven alapuolella häiriintyy vähemmän.

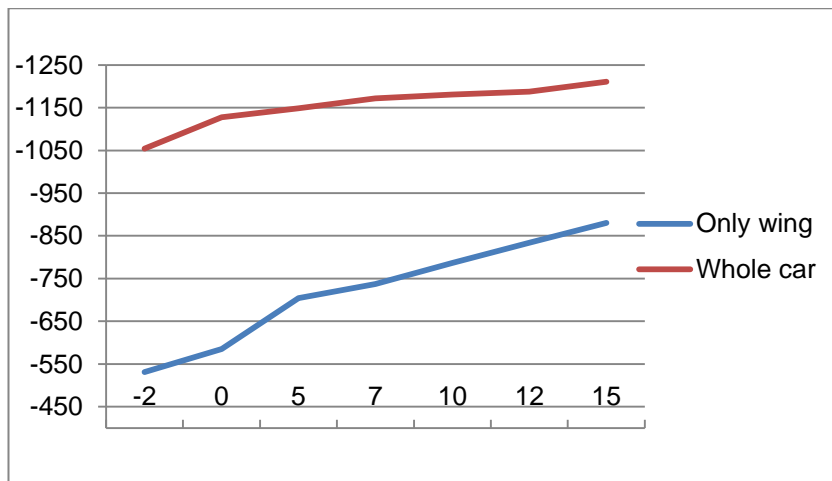
Seuraavaksi tutkittiin mihin siipi on järkevintä asentaa. Siipeä simuloitiin siiven mukana tulleilla jaloilla eri etäisyyksillä auton pituussuunnassa, 65 mm korkeilla korokkeilla ja ilman. Odotetusti korkein negatiivinen nostovoima saavutettiin siipi niin takana ja korkealla kuin mahdollista. Siiven sijainnilla ei ollut suurta vaikutusta ilmanvastukseen. Käytettävillä jaloilla siipi ei nouse niin korkealle, että se olisi täysin puhtaassa virtauksessa, joten 3D-profiilista on hyötyä varsinkin hitaammissa nopeuksissa. Tulosten perusteella siipi asennettiin mahdollisimman taakse ja korkealle.

Kuvassa 30 on esitetty ylhäällä siiven keskiosaan osuva virtaus ja alhaalla siiven reunoille osuva virtaus. Nähdään että virtaus on keskellä suuremmassa kulmassa ja hitaampaa kuin reunoilla. Siiven keskellä olevan miedomman profiilin pitäisi toimia paremmin näissä olosuhteissa ja estää sakkaaminen hitaammissa nopeuksissa. Siiven reunoilla virtaus on nopeampaa ja saapuu siivelle melkein vaakatasossa. Siiven reunoilla voidaan siis käyttää aggressiivisempaa profiilia. Jotta 3D-profiilista saataisiin kaikki hyöty irti, pitäisi siipi suunnitella alusta alkaen tietyn auton ja siiven sijainnin mukaan. APR GTC-200 näyttää kuitenkin sopivan melko hyvin yhteen tutkittavan auton kanssa.



Kuva 31. Virtauksen saapuminen takasiivelle. Ylhäällä siiven keskelle ja alhaalla siiven reunoille osuva virtaus.

Takasiiven paikan päättämisen jälkeen siipeä simuloitiin eri kulmissa irrallisena ja autoon kiinnitettynä. Kuvan 32 kuvaajassa esitetään tulokset siiven simulaatioista auton kanssa ja ilman autoa. Kuvaajassa Y-akselilla on negatiivinen nostovoima Newtonina ja X-akselilla siiven kulma. Nähdään, että siiven kulman kasvattamisella on verrattain pieni vaikutus negatiiviseen nostovoimaan siipi autoon kiinnitettynä, mutta yksinään simuloituna negatiivinen nostovoima kasvaa melko lineaarisesti 15 asteeseen asti.



Kuva 32. Takasiiven tuottama negatiivinen nostovoima eri kulmissa.

Kuvaajasta käy hyvin ilmi, kuinka erilaisissa olosuhteissa takasiipi on kiinnitettynä autoon verrattuna täysin vapaaseen virtaukseen. Paraview'ssa nähdään, että autoon kiinnitettynä siivelle katon yli tulevan virtauksen nopeus on vain noin 120 km/h. Siipi yksin simuloituna siivelle tuleva virtaus on simulaatioihin asetettu 160 km/h. Ero siivelle tulevan virtauksen nopeudessa ja tulokulmassa saavat virtauksen irtoamaan siiven alalaidasta autoon kiinnitetyssä siivessä. Kun virtaus irtoaa siiven alalaidasta, ei siipi tuota enää negatiivista nostovoimaa yhtä tehokkaasti ja kulman kasvattaminen vain pahentaa asiaa. Paraview osoittaa, että autoon kiinnitetystä siivestä virtaus irtoaa jo ennen siiven puoliväliä siipi 10 asteen kulmassa. Vapaassa virtauksessa ei havaittu merkkejä virtauksen irtoamisesta edes siipi 15 asteen kulmassa. Simulaatioiden perusteella siipi toimii autossa kiinni parhaiten 0 ja 7 asteen välillä. 7 asteen kulmassa virtaus ei vielä irtoa siiven alalaidasta ja siipi toimii tehokkaasti. Tätä havaintoa tukee myös simulaatioiden tuloksissa nähtävä L/D-kerroin, joka oli suurin 7 asteen kulmalla.

Taulukossa 6 on esitetty simulaatioiden tulokset ilman siipeä ja siipi 7 asteen kulmassa. Splitteri on simulaatioissa vaakatasossa 100 mm:n korkeudella.

Taulukko 6. Simulaatioiden tulokset ilman siipeä ja siipi 7 asteen kulmassa.

Malli	Vastus (N)	Noste (N)	Cd	Cl	CoP (m)	L/D
large_spats	916,64	-424,81	0,46	-0,21	-1,723	-0,46
wing_AOA_7	1126,66	-1172,28	0,55	-0,58	1,598	-1,04

Takasiipi on auton tärkein negatiivisen nostovoiman tuottaja, ja sen lisääminen kasvattaa negatiivisen nostovoiman melkein kolminkertaiseksi. Negatiivisen nostovoiman moninkertaistumisella on kuitenkin myös negatiivinen vaikutus ilmanvastukseen sen kasvaessa yli 200 N. Ennen siiven asentamista ilmanvastus ei ole noussut käytännössä lainkaan lähtötilanteeseen verrattuna. Ennen takasiipeä negatiivista nostovoimaa on kasvatettu pääasiassa parantelemalla autossa alun perin olleita aerodynaamisia ongelmakohtia, jotka ovat aiheuttaneet nostovoimaa ja ilmanvastusta. Takasiipi on ylimääräinen auton korilinjasta erilleen asennettava osa, ja ilmanvastuksen kasvamista on tässä tapauksessa mahdotonta estää.

Takasiiven tehokkuuden parantamista tutkittiin vielä suorittamalla simulaatioita muokatulla takasiivellä. Takasiivessä kokeiltiin suurempia päätylevyjä ja gurney-laippaa. Koko autolla suoritettu simulaatio ei ollut tarpeeksi tarkka gurney-laipan ja päätylevyjen vaikutuksen tutkimiseen, joten simulaatiot suoritettiin pelkällä siivellä. Nämä simulaatiot suoritettiin nopeuden 160 km/h lisäksi nopeudella 120 km/h. Erot tuloksissa olivat molemmilla nopeuksilla hyvin samankaltaiset. Gurney-laipalla, joka oli korkeudeltaan 5 % siiven profiilin pituudesta, nähtiin noin 30 %:n nousu ilmanvastuksessa ja 15 %:n nousu negatiivisessa nostovoimassa. Gurney-laipalla ei yrityksistä huolimatta saatu toivottuja tuloksia, joten todettiin, että gurney-laipan tutkimista jatkettaisiin tämän työn ulkopuolella. Gurney-laipalla saatujen tulosten takia epäillään, että simulaation tarkkuus ei riitä näin pieniin muutoksiin, eikä virtaus käyttäydy simulaatiossa niin kuin sen kuuluisi. Suuremmilla päätylevyillä ajetuissa simulaatioissa nähtiin noin 5 %:n lasku ilmanvastuksessa ja vastaava nousu negatiivisessa nostovoimassa. Paraview'illa takasiipeä tutkimalla nähtiin, että alkuperäisillä päätylevyillä negatiivisen paineen alue yltää hiukan päätylevyn alle. Suurempi päätylevy ei päästä korkeampaa painetta sivulta siiven alle ja parantaa näin ollen siiven tuottamaa negatiivista nostovoimaa. Päätylevyjen aiheuttamat muutokset olivat kuitenkin pelkällä siivellä tehdyissäkin simulaatioissa niin marginaalisia, että niitä päätettiin tutkia enemmän käytännön kokeilla tämän työn ulkopuolella.

Takasiivellä saatuihin tuloksiin oltiin hieman pettyneitä. Odotuksena oli, että siiven hyötysuhde olisi ollut parempi. Hiukan toivottua huonommasta hyötysuhteesta huolimatta takasiipi lisäsi negatiivista nostovoimaa melkein 750 N ja siirsi paineen keskipistettä noin 3,3 m taaksepäin vain 0,4 m:n päähän auton painopisteestä. Alun perin toivottiin, että takasiivellä olisi saatu siirrettyä paineen keskipiste auton painopisteen takapuolelle. Takasiivellä tehtyjen simulaatioiden jälkeen pelättiin, että

paineen keskipiste jäisi liian eteen ja että etupään tuottamaa negatiivista nostovoimaa jouduttaisiin rajoittamaan.

7.7 Säädettyvyys

Suunnitteluprosessin loppupuolella mallilla suoritettiin simulaatioita eri splitterin ja takasiiven kulmilla, jotta nähtiin, kuinka paljon negatiivista nostovoimaa on mahdollista tuottaa ja kuinka paljon negatiiviseen nostovoimaan ja paineen keskipisteeseen voitaisiin vaikuttaa varikolla tehtävissä olevilla säädöillä. Splitterin säätöalue rajattiin 0–2 asteeseen ja takasiiven 0–7 asteeseen.



Kuva 33. Kauden 2017 aerodynaaminen kokoonpano.

Samassa yhteydessä simuloitiin kuvassa 33 esitettyä autoa edellisen kauden aerodynaamisella kokoonpanolla. Autossa oli tällöin etulippa, pienempi vaakatasossa oleva splitteri ja suuri takalippa, jonka kulmaa voitiin muuttaa. Alla olevasta taulukosta nähdään vanhalla kokoonpanolla saadut simulaation tulokset.

Taulukko 7. Simulaation tulokset vuoden 2016 kokoonpanolla.

Malli	Vastus (N)	Noste (N)	Cd	Cl	CoP (m)	noste/vastus
Old_setup	998,95	-509,43	0,50	-0,26	1,26	-0,51

Uuden kokoonpanon splitterin ja takasiiven säädöillä saavutettu takimmaisoin paineen keskipiste (Front_0_Rear_7), etummaisoin paineen keskipiste (Front_2_Rear_0) ja suurin negatiivinen nostovoima (Front_2_Rear_7) nähdään taulukosta 8.

Taulukko 8. Simulaatioiden tulokset splitterin ja takasiiven säädöillä.

Malli	Vastus (N)	Noste (N)	Cd	Cl	CoP (m)	noste/vastus
Front_0_Rear_7	1126,66	-1172,28	0,55	-0,58	1,60	-1,04
Front_2_Rear_0	1064,67	-1290,30	0,51	-0,62	1,25	-1,21
Front_2_Rear_7	1118,80	-1373,17	0,54	-0,66	1,36	-1,23

Simulaatioiden tuloksista nähdään, että negatiivinen nostovoima ja nostovoiman ja vastuksen suhde ovat yli kaksi kertaa suurempia uudella kokoonpanolla. Simulaatioiden perusteella suunniteltu kokoonpano on ylivoimainen verrattuna vuonna 2016 käytettyyn kokoonpanoon.

Tuloksista nähdään että uudella kokoonpanolla paineen keskipiste on säädettävissä 1,25 m:n ja 1,60 m:n välillä. Etuakselilla tuotetaan 63–80 % negatiivisesta nostovoimasta verrattuna taka-akseliin. Uudella kokoonpanolla on siis mahdollista saavuttaa sama paineen keskipiste kuin vanhalla kokoonpanolla. Simulaatioiden mukaan paineen keskipisteet ovat kuitenkin melko edessä ja tulosten pitäessä paikkaansa voisi auton olettaa käyttäytyvän melko yliohtautuvasti suuremmissa nopeuksissa. Suurin 1373 N:n negatiivinen nostovoima saavutettiin splitteri 2 asteen kulmassa ja takasiipi 7 asteen kulmassa. Pienin 1128 N:n negatiivinen nostovoima saatiin splitteri ja siipi vaakatasossa.

8 Valmistus

Suunnittelun jälkeen siirryttiin tarvittavien komponenttien valmistukseen ja asennukseen. Splitteri ja puskurin ilmanohjaimet olivat ainoat komponentit, jotka oli valmistettava alusta loppuun itse. Etulippa ja spoileri olivat olleet kiinni ajoneuvossa jo aiemmin ja takasiipi hankittiin asennusvalmiina.

Ilmanohjaimet valmistettiin 5 mm paksusta PE300-polyeteenimuovilevystä. Materiaali valittiin, koska se oli helppoa työstää tarvittuun muotoon, mutta samalla melko kevyttä ja jäykkää. Kuvassa 34 esitetty ilmanohjaimet valmistettiin leikkaamalla muovi pahvista

tehdyn sovituspalan muotoon, minkä jälkeen muovi taivutettiin puskurin muodon mukaan ja kiinnitettiin pultein puskuriin ja lokasuojiin.



Kuva 34. Keskeneräinen ilmanohjain.

Splitterin valmistaminen aloitettiin materiaalin valinnalla. Splitterin oli oltava mahdollisimman kevyt, jäykkä ja edullinen. Splitteri vahingoittuu helposti pienessäkin ulosajossa, joten sen oli oltava kohtuullisin kustannuksin uusittavissa. Amerikassa harrasteajoneuvojen splittereissä usein käytettävää $4,9 \text{ kg/m}^2$ [14, s. 6] painavaa Alupalite-alumiinikerroslevyä vastaavaa tuotetta yritettiin löytää paikalliselta toimittajalta ilman tulosta. Lähin löydetty vastaava tuote oli 3 mm paksu Dibond-alumiinikerroslevy, joka painaa $3,8 \text{ kg/m}^2$ [15, s. 69]. Tarvittavan jäykkyyden saavuttamiseksi Dibondin levyjä olisi jouduttu liimaamaan kolme päällekkäin, jolloin splitteri olisi painanut $11,4 \text{ kg/m}^2$. Koska sopivaa alumiinikerroslevyä ei löytynyt ja komposiittilevyn käytöstä olisi tullut liikaa kustannuksia, päätettiin splitteri valmistaa kosteutta kestävästä filmivanerista. Vaneri on kohtalaisen jäykkää, helposti muotoiltavissa, edullista ja painaa 9 mm paksuna levynä $6,2 \text{ kg/m}^2$ [16, s. 16].

Vaneri leikattiin oikeaan muotoon Catiasta saatujen mittojen avulla. Splitterin kiinnitys tehtiin sellaiseksi, että sen kulmaa voi säätää, ja että tarvittaessa se on helposti ja nopeasti irrotettavissa kokonaan. Splitterin takaosaan valmistettiin kannake, jonka avulla splitteri kiinnittyy edestä päin työntämällä apurungon ja ohjaustehostimen kannakkeiden väliin. Sivukiinnikkeet valmistettiin alumiinisesta lattatangosta ja ne

kiinnittävät splitterin pyöräkoteloihin. Sivukiinnikkeet estävät splitterin liikkumisen eteenpäin ja putoamisen apurungosta. Splitterin etuosasta puskurin törmäyspalkkiin asennettiin vanttiruuvit, jotka tukevat splitteriä etuosasta ja joiden avulla splitterin kulma on helposti säädettävissä. Näillä kannakkeilla splitteri on irrotettavissa muutamassa minuutissa avaamalla 4 pulttia, nostamatta autoa. Kannakkeista tehtiin niin tukevat, että splitterin päällä pystyy seisomaan sen antamatta periksi. Splitterin etureunaan asennettiin tiiviste, joka estää virtauksen pääsemisen splitterin ja etulipan väliin, kun splitterin kulmaa muutetaan. Kuvassa 35 on esitetty valmiit splitteri ja ilmanohjaimet.



Kuva 35. Splitteri ja ilmanohjaimet valmiina asennettavaksi.

Takasiipi pultattiin takaluukkuun siiven mukana tulleilla jaloilla. Aluksi harkittiin takasiiven kiinnittämistä suoraan koriin, mutta todettiin, että takaluukku kestää siiven tuottaman melko maltillisen negatiivisen nostovoiman. Suora kiinnitys koriin olisi hankaloittanut huomattavasti takaluukun käyttöä. Takasiiven säätö oli alun perin toteutettu alumiinisilla kierteillä, mutta niiden käyttö todettiin liian hitaaksi ja hankalaksi. Kuvassa 36 näkyvä korvaava säätömekanismi valmistettiin alumiiniprofiilista. Siiven kulma on säädettävissä avaamalla kaksi pulttia.



Kuva 36. Takasiiven kiinnitys takaluukkuun ja itse valmistettu kulman säätömekanismi.

9 Käytännön kokeen suoritus

Käytännön koe suoritettiin Ahveniston moottoriradalla 7.5.2017 vakaissa ja kuivissa sääolosuhteissa. Testissä käytettiin Federal 595RS-R rata- ja liikennekäyttöön tarkoitettuja renkaita. Ahveniston moottorirata valittiin käytännön kokeeseen, sillä sama kuljettaja on ajanut tutkittavalla autolla siellä satoja kierroksia viimeisen kolmen vuoden aikana. Tuntemattomalla radalla taitavankin kuljettajan kierrosajat voivat heitellä monia kymmenyksiä. Tutun radan valinnalla pyrittiin minimoimaan kuljettajan aiheuttamat muuttujat käytännön kokeessa.

Koe aloitettiin ajamalla aamupäivä ilman splitteriä, ilmanohjaimia ja takasiipeä. Etulippa ja spoileri päätettiin pitää kiinni myös aamupäivällä, jotta auto olisi aerodynaamisesti mahdollisimman neutraali. Simulaatioiden mukaan etulippa ja spoileri kiinni auto tuottaa vain noin 60 N nostovoimaa. Radalla oli hiljaista koko aamupäivän ja autoa saatiin testattua ilman ruuhkaa ja muiden autojen tuottamaa häiriötä. Aamupäivällä ajatut kierrosajat olivat luokkaa 1:31.0 ja nopein kierrosaika oli 1:30.7.

Noin päivän puolessa välissä splitteri, ilmanohjaimet ja takasiipi kiinnitettiin autoon ja loppupäivä käytettiin uuden aerodynaamiseen kokoonpanoon säätämiseen (kuva 37). Säätäminen aloitettiin asettamalla splitteri vaakatasoon ja takasiipi 10 asteen kulmaan.

Näillä säädöillä auto aliohjasi yllättävän voimakkaasti ja splitterin kulmaa päätettiin muuttaa. Splitterin kulmaa lisättiin varovasti pikkuhiljaa ja auto alkoi kääntyä mutkiin paremmin ja paremmin. Auto oli splitteri kahden asteen kulmassakin vielä liian aliohjautuva, ja takasiiven kulmaa päätettiin laskea. Paras tasapaino löydettiin lopulta splitteri kahden asteen ja takasiipi seitsämän asteen kulmassa.



Kuva 37. Splitterin kiinnitys autoon.

Auton käyttäytymisessä nopeissa mutkissa havaittiin selkeä ero aamupäivän ja iltapäivän välillä. Auto kääntyi iltapäivällä mutkiin terävämmin ja etupään pito oli helpommin hallittavissa. Kierrosajat olivat päivän loppupuolella luokkaa 1:30.0 iltapäivän nopeimman kierroksen ollessa 1:29.6.

Ero auton käyttäytymisessä aamu- ja iltapäivän välillä oli yllättävän suuri. Kierrosajassa nähtiin yli sekunnin parannus, mutta ennen GPS-datan tarkempaa tutkintaa, ei kierrosajoista haluttu tehdä hätiköityjä johtopäätöksiä. Voitiin kuitenkin todeta, että testipäivä oli onnistunut. Uudet osat kestivät rata-ajon hyvin ja muutamasta splitterin kanttariin osumisesta huolimatta mitään ei vaurioitunut.

10 Tulosten analysointi

10.1 Simulaatiot

Lopputulos simulaatioiden osalta on esitetty taulukossa 9. Taulukossa on esitetty tulokset simulaatioista vakiomallilla ja lopullisella kokoonpanolla, jolla saavutettiin paras tulos käytännön kokeessa. Ajokorkeus ja renkaiden koko ovat molemmissa simuloituissa kokoonpanoissa vastaavat.

Taulukko 9. Simulaatioiden tulokset lähtö- ja lopputilanteesta.

Malli	Vastus (N)	Noste (N)	Cd	Cl	CoP (m)	L/D
stock_lowered_wheels	908,71	617,35	0,46	0,31	3,085	0,68
final_setup	1131,58	-1362,08	0,54	-0,65	1,428	-1,20

Suunnittelun lopputuloksena ilmanvastus kasvoi simulaatioiden mukaan noin 220 newtonia ja ajoneuvo saatiin tuottamaan 1360 newtonia negatiivista nostovoimaa. Kasvu ilmanvastuksessa oli sitä luokkaa, kuin suunnittelun alkuvaiheessa arveltiin ja negatiivista nostovoimaa saavutettiin noin puolet enemmän kuin alunperin arvioitiin.

Simulaatioiden numeerisia tuloksia ei kuitenkaan voida pitää täysin luotettavina, eikä niiden perusteella voida määrittää kuinka suuria voimia virtaus luo ajoneuvoon todellisuudessa. Työn suorittamiseen käytetyillä työkaluilla ei voida todeta, kuinka tarkasti simulaatioiden tulokset pitävät paikkansa. Simulaatioissa on niin paljon muuttujia, että tuloksien vääristyminen verrattuna todellisuuteen on väistämätöntä. Simulaation tulosten paikkansa pitävyyttä arvioidessa on otettava huomioon simulaatioiden suorittaminen käsin mallinnetulla 3D-mallilla ja ohjelmistolla, joka ei ole yhtä tehokas ja tarkka kuin ammattilaisilla käytössä olevat ohjelmistot. Jos simulaatiot olisi suoritettu tarkasti skannatulla mallilla ja ammattilaisten käyttämillä ohjelmistoilla ja laitteilla, voitaisiin numeerisia arvoja pitää huomattavasti luotettavampina.

Simulaatioiden tuloksiin ollaan kuitenkin työkalut huomioon ottaen erittäin tyytyväisiä. Muutoksiin numeerisissa arvoissa löytyi melkein poikkeuksetta looginen selitys virtausta visuaalisesti tarkastelemalla. Tulosten analysointi ei kuitenkaan ollut aina täysin suoraviivaista, ja vasta virtausta visuaalisesti tutkimalla saatettiin esimerkiksi huomata, että muutos auton takapäässä vaikuttikin enemmän auton etupään virtaukseen. Suunnitteluprosessissa oli erittäin tärkeää, että ymmärrettiin mistä

muutokset numeerisissa arvoissa johtuivat, jotta tutkittavaa osa-aluetta pystyttiin muuttamaan paremmaksi. Tyytyväisiä ollaan myös siihen, että tulokset olivat suuruudeltaan uskottavia. Jos negatiivista nostovoimaa olisi tulosten mukaan saavutettu esimerkiksi kaksinkertainen määrä, ei tulosta voitaisi pitää enää uskottavana.

Tulosten mukaiset ilmanvastus- ja nostovoimakertoimet ovat samaa suuruusluokkaa, kuin kilpa-autoissa, joissa on samantapaisia muutoksia. Kilpa-autojen tarkkoja aerodynaamisia arvoja on kuitenkin hyvin vähän julkisesti saatavilla, joten tulosten vertaaminen tarkemmin muihin ajoneuvoihin on vaikeaa. Voidaan kuitenkin todeta, että tulosten suuruusluokka on uskottava ja ajoneuvo ei tulosten mukaan tuota yhtä paljon negatiivista nostovoimaa kuin esimerkiksi Formula 1- tai prototyypiluokan auto.

Vaikka tulokset ovat uskottavia, niin useista lähteistä saatua tietoa yhdistelemällä voidaan päätellä, että simulaation ilmoittavat voimat ovat suurempia kuin voimat, joita virtaus todellisuudessa luo ajoneuvoon. Vakion Mazda Miatan ilmanvastuskertoimen voidaan päätellä olevan noin 0,38 vertaamalla muihin samankaltaisiin autoihin [3, s. 264]. Tässä työssä vakioautoa simuloidessa ilmanvastuskertoimeksi saatiin 0.44, joka on noin 16% suurempi kuin arvioitu ilmanvastuskerroin. Myös nostovoima ja nostovoimakerroin vaikuttavat suurilta. Lähteistä on löydetty joitakin kilpa-autoja, joille ilmoitetut nostovoimakertoimet ovat samaa luokkaa kuin simulaation mukaan lopullisessa kokoonpanossa. Vuoden 1995 McLaren F1 GTR -kilpa-auton ilmanvastuskertoimeksi on ilmoitettu 0.57 ja nostovoimakertoimeksi -0.60. Vuoden 1991 IMSA-sarjassa kilpailleen Mazda RX-7 GTO:n ilmanvastuskertoimeksi on ilmoitettu 0.48 ja nostovoimakertoimeksi -0.53 [3, s. 22, s. 50]. On epäiltävä, että tässä työssä suunniteltu kokoonpano tuottaisi paremman nostovoimakertoimen kuin nämä varta vasten kilpaillemista varten suunnitellut autot.



Kuva 38. Vasemmalla Mazda GTO ja oikealla McLaren F1 GTR. [17; 18]

Itse simulaation lisäksi puutteet 3D-mallissa aiheuttavat varmasti vääristymää simulaation tuloksiin. Käsien mallinnettu malli ei vastaa täysin auton alkuperäisiä muotoja. Mallista puuttuvat yksityiskohdat muuttavat virtausta ajoneuvon pinnoilla. Suurin selkeä mallinnuksesta johtuva osa-alue, joka vääristää simulaation tuloksia, on auton pohja. Pohjan mallinnuksen kanssa tehty kompromissi vääristää simulaation tuloksia, ja on mitä luultavimmin yksi suurimmista syistä, miksi saadut nostovoimat vaikuttavat suurilta. Mallinnettu pohja on todellisen auton pohjaa huomattavasti sulavampi ja aiheuttaa näin ollen huomattavasti vähemmän pyörteilyä ja turbulenttista virtausta auton alle. Sulavampi mallinnettu pohja antaa splitterille todellisuutta parempia tuloksia, koska se parantaa virtausta auton alla. Tämän pohjalta paineen keskipisteen voidaan olettaa sijaitsevan todellisuudessa simulaatioiden tuloksia taempana. Käytännön kokeessa havaittu ajoneuvon käyttäytyminen tukee tätä päättelyä. Simulaation mukaan lopullisen kokoonpanon paineen keskipiste sijaitsee 1,43 m auton keulasta, eli 72 prosenttia negatiivisesta nostovoimasta tuotetaan etuakselilla. Tällöin ajoneuvon voisi olettaa käyttäytyvän erittäin yliohtautuvasti, mitä käytännön kokeessa tällä kokoonpanolla ei kuitenkaan havaittu.

Simulaatioiden tärkein funktio täyttyi ja suunnittelun aikana tuloksissa nähdyt erot olivat havaittavissa ja suuruusluokaltaan uskottavia. Jos suunnittelussa mentäisiin tarkempiin yksityiskohtiin ja virtausta alettaisiin esimerkiksi ohjailla enemmän eri elementeille, muodostuisi simulaation suuripiirteisyyttä suuremmaksi ongelmaksi.

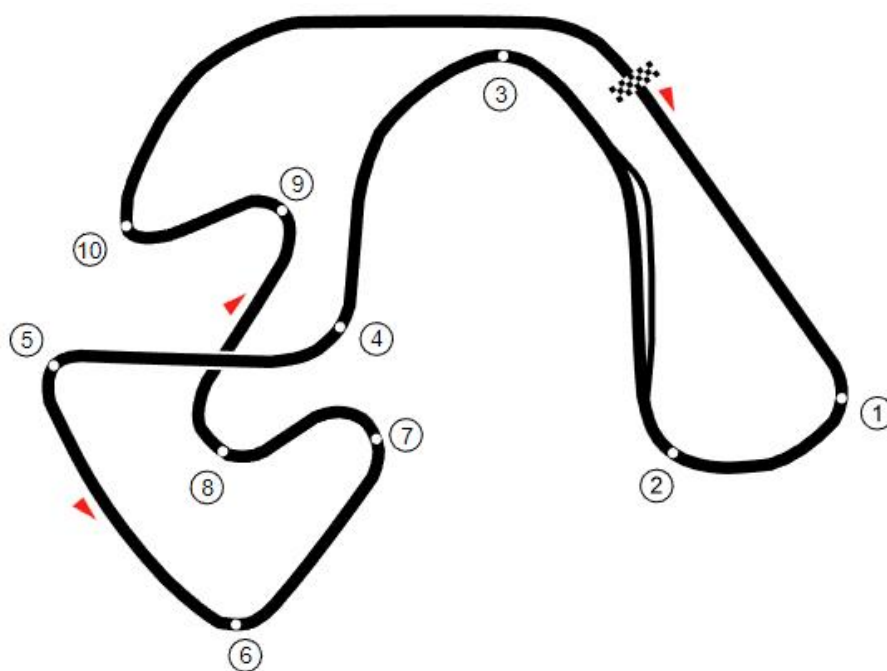
10.2 Käytännön koe

Käytännön kokeessa kierrosaikojen mittaamiseen käytettiin Garminin valmistamaa GLO-GPS-vastaanotinta ja Racechrono-ohjelmistoa. Valmistaja ilmoittaa vastaanottimen tarkkuudeksi 3 m ja päivitystaajuudeksi 10 Hz [19]. Sijainnin määrittämisen tarkkuus riippuu signaalin vahvuudesta ja laitteeseen yhteydessä olevien satelliittien lukumäärästä. Ahveniston moottoriradan ympärillä on paljon mäkiä ja korkeita puita, jotka häiritsevät vastaanottimen toimintaa.

Racechrono on kierrosaikojen mittaamisen tarkoitettu puhelimeen asennettava ohjelmisto, joka tallentaa myös GPS-vastaanottimen dataa. Yksinkertaisuudessaan ohjelmaan asetetaan kierroksen alkupisteen koordinaatit ja ohjelma mittaa aikaa, joka kuluu pisteen kautta kulkujen välillä. Kierrosaikoja voidaan seurata puhelimen näytöltä reaaliaikaisesti ajaessa ja dataa voidaan tarkastella tarkemmin varikolla.

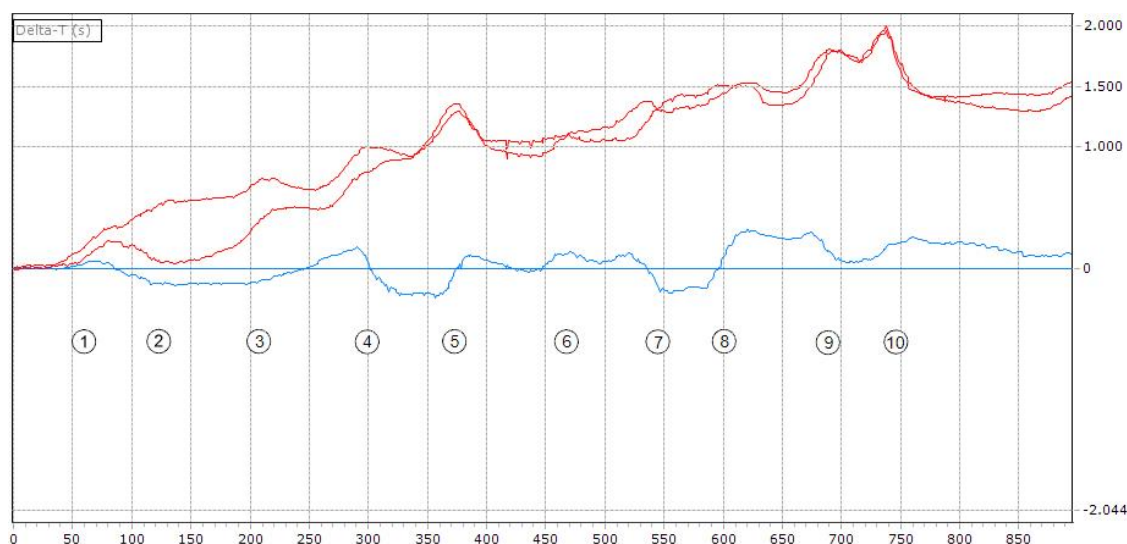
Vastaanottimen mittaamien kierrosaikojen varmistamiseksi käytettiin apuna onboard-kameran videokuvaa. Videokuvaa tallennettiin kuvataajuudella 60 kuvaa/s. Kuvista pystyttiin laskemaan kierrosajat kiintopisteen perusteella. Vastaanottimen ilmoittamien ja videokuvalta määriteltujen kierrosaikojen erot olivat alle 0,05 sekuntia. Voidaan siis todeta, että kierrosajat pystyttiin määrittämään vähintään 0,10 sekunnin tarkkuudella.

Ahveniston rata voidaan jakaa kahteen osaan käytännön kokeen tulosten analysoinnin helpottamiseksi. Kaikki mutkat ennen mutkaa 5 ovat miniminopeudeltaan yli 100 km/h. Mutkasta 5 eteenpäin kaikkien paitsi mutkan 6 miniminopeudet ovat alle 75 km/h. Kaikki radan nopeat mutkat, joissa aerodynamiikasta on enemmän hyötyä, ovat siis radan ensimmäisellä puoliskolla.



Kuva 39. Ahveniston kilparadan ratakartta. [20]

Vastaanottimella kerätty GPS-data tallennettiin Racechrono-ohjelmistolla .vbo-tiedostoksi, jota voidaan tarkastella Circuit Tools -ohjelmalla. Circuit tools on kilpa-autojen keräämän GPS-datan analysointiin tarkoitettu ohjelma, jonka avulla voidaan tarkastella maksimissaan kuuden eri kierroksen eroja.

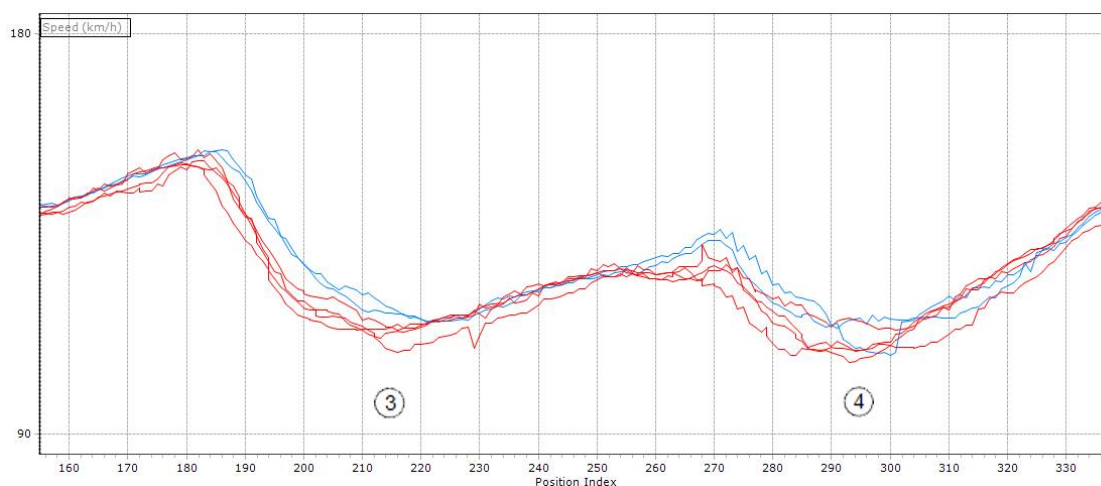


Kuva 40. Delta-aikakuvaaja koko kierrokselta.

Kuvassa 40 on delta-aikakuvaaja, johon on valittu kaksi kierrosta aamupäivältä ja kaksi kierrosta iltapäivältä. Kierrokset valittiin kuvaajaan, sillä niiden GPS-datassa on vähiten häiriöitä. Punaisella on kuvattu ilman aerodynaamisia muutoksia aamupäivällä ajettua kaksi kierrosta, joiden ajat ovat 1:31.1 ja 1:31.2 ja sinisellä kaksi iltapäivällä aerodynaamisten muutosten kanssa ajettua kierrosta, joiden ajat ovat 1:29.7 ja 1:29.8. Nopein kierros on esitetty kuvaajassa vaakasuorana viivana. Kuvaajan x-akseli ilmoittaa kierroksen etenemisen ja y-akseli aikaeron nopeimpaan kierrokseen (1:29.7) kullakin hetkellä. Kuvaajaan on merkitty numeroilla mutkat ratakartasta (kuva 39).

Kun tarkastellaan aikaeron kehitystä aamu- ja iltapäivän kierrosten välillä, nähdään, että eroa on syntynyt viidenteen mutkaan mennessä noin sekunti. Viidennestä mutkasta kahdeksanteen mutkaan eroa on syntynyt puoli sekuntia lisää ja kierroksen lopussa ero on melkein sama. Kuvaajasta päätellen mutkat 5, 9 ja 10 on ajettu eri tavalla aamu- ja iltapäivällä, sillä ero kasvaa mutkiin mennessä ja pienenee ulostuloissa.

Suurin osa aikaerosta aamu- ja iltapäivän välillä syntyy radan neljässä nopeimmassa mutkassa radan ensimmäisen kolmanneksen aikana. Kuvassa 41 on kuvattu ajonopeutta radan nopeimmissa ja haastavimmissa mutkissa kolme ja neljä. Nähdään, että iltapäivällä mutkiin on voitu jarruttaa myöhemmin ja sisäänmenonopeudet ovat olleet suuremmat. Ulostulonopeudet ovat olleet aamu- ja iltapäivällä samaa luokkaa.



Kuva 41. Kuvaaja nopeudesta radan nopeimmissa mutkissa 3 ja 4.

Negatiivisen nostovoiman takia parantunut absoluuttinen pito auton ja radan pinnan välillä ole ainut syy kierrosaikojen paranemiseen. Toinen suuri aerodynamiikasta johtuva kierrosaikoihin vaikuttava tekijä on negatiivisen nostovoiman tuoma vakaus, joka antaa kuljettajalle lisää luottamusta auton käyttäytymiseen ja mahdollistaa ajamisen lähempänä pidon rajaa.

Myös aerodynamiikan ulkopuolella olevat tekijät ovat vaikuttaneet kierrosaikojen kehitykseen. Käytännön koe suoritettiin keväällä, jolloin rata on ollut melko pölyinen ja likainen vähäisen käytön takia. Rata muuttuu nopeammaksi päivän mittaan radan pinnan puhdistuessa ja lisäksi siihen jää kumia rataa kiertävien autojen renkaista. Kuljettaja mukautuu auton käyttäytymiseen ja vallitseviin olosuhteisiin, vaikka auton käytöksessä ei olisi muutosta, ja kierrosajat paranevat päivän edetessä.

Kerätyn datan rajallisuuden ja kaikkien muuttujien yhteenlasketun vaikutuksen takia käytännön kokeen perusteella ei voida varmasti määrittää, kuinka paljon aerodynaamiset muutokset vaikuttivat kierrosaikoihin.

11 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tämän työn tavoite oli kehittää ratapäiväauton aerodynamiikkaa numeerisen virtausdynamiikkasimuloinnin avulla. Tutkittu ajoneuvo 3D-mallinnettiin ja mallilla suoritettiin virtausdynamiikan simulaatioita. Simulaatioiden visuaalisten ja numeeristen tulosten perusteella auton aerodynamiikkaan tehtiin parannuksia työn rajaukset huomioon ottaen. Simulaatioiden avulla suunnitellut parannukset toteutettiin

käytännössä ja aerodynamiikan toimintaa testattiin käytännön kokeella Ahveniston moottoriradalla.



Kuva 42. Tutkittu auto Ahveniston moottoriradalla.

Työlle asetetut tavoitteet saavutettiin. Auto saatiin tuottamaan negatiivista nostovoimaa ilmanvastuksen kasvaessa kohtuullisesti. Simulaatioiden tulokset olivat järkeviä ja käytännön kokeessa kierrosajat paranivat aerodynamisten muutosten myötä jopa enemmän kuin odotettiin. Aerodynamiikan vaikutusta muutoksiin kierrosajoissa ei voitu kuitenkaan määrittää varmasti muiden muuttujien takia.

Seuraavia asioita olisi voitu parantaa, tai tehdä eri tavalla, parempien tulosten saavuttamiseksi. Ajoneuvon käsin 3D-mallinnukseen ja mallin säätämiseen sopivaksi virtausdynamiikan simulointia varten jouduttiin käyttämään paljon aikaa. Suuresta ajan käytöstä huolimatta malli ei ollut täydellinen ja aiheutti vääristymää simulaatioiden tuloksiin. Ajoneuvon skannaaminen olisi voinut olla mallinnukseen käytetty aika huomioon ottaen järkevää.

Simulointi olisi helpottunut ja tulokset olisivat olleet luotettavampia, jos autoon olisi suunniteltu ja toteutettu tasainen pohja. Tasaisen pohjan suunnittelussa ja valmistuksessa olisi kuitenkin ollut suuri työ. Aerodynamiikan lisäksi pohjalevyn suunnittelussa olisi täytynyt huomioida esimerkiksi lämmön poistuminen vaihdelaatikosta ja pakoputkistosta.

Käytännön koe olisi voitu suorittaa enemmän aerodynamiikkaa korostavalla kilparadalla ja dataa olisi voitu kerätä enemmän. Ahveniston moottorirata ei ollut paras mahdollinen paikka testata aerodynamiikkaa radan haastavuuden, kapeuden ja mutkien hitauden takia. Kokeesta kerättiin vain GPS-dataa. Dataa olisi ollut mahdollista kerätä myös moottorinohjaukselta ja verrata esimerkiksi moottorin käyntinopeutta GPS-dataan. Kokeessa olisi voitu ajaa aerodynaamisten muutosten jälkeen vielä ilman muutoksia, jolloin käytännön kokeen tulokset olisivat olleet hieman luotettavampia. Tämä olisi kuitenkin ollut vaikeaa toteuttaa rajallisen ajan takia.

Työn kokonaisuutta ajatellen virtausdynamiikan simuloinnista oli hyötyä. Ilman simulaatioita ja niiden avulla tehtyä suunnittelua ei olisi päästy yhtä toimivaan lopputulokseen. Esimerkiksi splitterin kulman ja eturenkaiden ilmanohjainten tärkeyttä ei osattu ennakoida. Aerodynamiikan ammattilainen olisi luultavasti päässyt yhtä hyvään tai jopa parempaan lopputulokseen ilman simulaatioita, mutta kokemattomalle suunnittelijalle simulaatiot olivat todella arvokas apu.

Vaikka auton mallinnukseen ja simulaatioiden suorittamiseen joudutaan käyttämään paljon aikaa ja vaivaa, niin virtausdynamiikan simuloinnin avulla voidaan saavuttaa etua amatööritason kilpa-autoilussa nykyisin kuluttajille saatavilla olevia työkaluja käyttämällä. Sen myötä, kun ammattilaiset siirtyvät yhä enemmän tuulitunnelien käytöstä virtausdynamiikan simulointiin, kehittyä simulointiin liittyvä teknologia ja myös kuluttajat pääsevät käsiksi yhä tehokkaampiin työkaluihin. Virtausdynamiikan simulointi tulee varmasti yleistymään jatkossa niin kilpa-autoilun huipulla kuin amatööritasolla.

Lähteet

- 1 McBeath, Simon. 2017. Competition Car Aerodynamics 3rd Edition Ebook. Dorset: Veloce House.
- 2 Sugarman, George. 2016. Lotus 49 - a Formula One car that changed the game forever. Verkkoaineisto. <<http://www.snaplap.net/lotus-49-a-milestone-formula-one-car/>>. 9.2.2016. Luettu 19.2.2018
- 3 Katz, Joseph. 1995. Race Car Aerodynamics 1st Edition. Cambridge: Bentley Publishers.
- 4 Time Attack sääntökirja. 2017. Radalle.com. Verkkoaineisto. <http://www.timeattack.fi/data/docs/2017_timeattack_saannot.pdf>. 23.2.2017. Luettu 12.1.2017.
- 5 Suvanto, Kari. 2010. Tekniikan Fysiikka 1. Helsinki: Edita Publishing Oy.
- 6 Sorensen, Bent & Damborg, Svend. 1999. Mosley's Equations. Verkkoaineisto. Autosport. <<http://atlasf1.autosport.com/99/san/preview/soerensen.html>>. Luettu 20.6.2018.
- 7 2018 UNIVERSAL AERO KIT CONCEPT RENDERINGS. 2017. Verkkoaineisto. Indycar. <<http://www.indycar.com/photos/gallery?g=3087>>. 24.5.2017. Luettu 19.1.2018
- 8 Hall, Nancy. 2015. Center of Pressure. Verkkoaineisto. NASA. <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/cp.html>>. Luettu 16.1.2018.
- 9 Under Suzuki chasing the win in 2017! 2017. Verkkoaineisto. World Time Attack. <<http://www.worldtimeattack.com/index.php/under-suzuki-wtac-2017/>>. Luettu 19.1.2018
- 10 Gurney Flaps. 2016. Helicopters and Aircrafts. Verkkoaineisto. heli-air. <<http://heli-air.net/2016/02/26/gurney-flaps/>>. 26.2.2016. Luettu 30.1.2018.
- 11 Tailgate spoiler. Verkkoaineisto. Audi AG. <https://shops.audi.com/en_GB/web/zubehoer/p/tailgate-spoiler-8w5071641a-3q0-14?category=8000:904_ASOS:Category>. Luettu 2.3.2018.
- 12 Parry, Tommy. 2017. Porsche's 911 RSR Goes Mid-Engine. Verkkoaineisto. <<http://www.turnology.com/news/porsches-911-rsr-goes-mid-engine/>>. 31.1.2017. Luettu 2.3.2018.

- 13 GTC-200 Adjustable wing. 2014. Verkkoaineisto. APR Performance.
<<http://aprperformance.com/racing-product/gtc-200-adjustable-wings/>>. Luettu 10.3.2017.
- 14 Sign Panel Products. 2018. Laminators INC. Verkkoaineisto.
<https://www.laminatorsinc.com/sites/www.laminatorsinc.com/files/pdf/signpanelproducts_2_18_web_-_final_030918.pdf>. Luettu 7.2.2018.
- 15 Tekniset muovit. 2015. Verkkoaineisto. Etola yhtiöt.
<http://www.etra.fi/uploads/pdf/Tekniset_muovit_2015.pdf>. Luettu 7.2.2018.
- 16 Vanerikäsikirja. 2005. Verkkoaineisto. Metsäteollisuus Ry.
<<https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Vanerik%C3%A4sikirja.pdf>>. Luettu 7.2.2018.
- 17 RX-7 | Race success across the globe. 2015. Verkkoaineisto. Insidemazda.
<<https://www.insidemazda.co.uk/2015/05/25/rx-7-race-success-across-the-globe/>>. 25.5.2015. Luettu 10.3.2018.
- 18 Trillo, Enrique. 2015. La curiosa historia de cómo nació el McLaren F1 GTR. Autobild. Verkkoaineisto. <<https://www.autobild.es/noticias/asi-nacio-mclaren-f1-gtr-243877>>. 2.2.2015. Luettu 10.3.2018.
- 19 GLO™. 2018. Verkkoaineisto. Garmin Ltd. <<https://buy.garmin.com/en-US/US/p/109827>>. Luettu 12.3.2018.
- 20 User:Rumbin. 2013. Verkkoaineisto. Wikipedia Commons.
<<https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Rumbin>>. 28.3.2013. Luettu 2.3.2018.